



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# KONSTRUKCE JEDNOKOLOVÉHO MOBILNÍHO ROBOTU SE SCHOPNOSTÍ SKÁKÁNÍ

DESIGN OF SINGLE-WHEEL MOBILE ROBOT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Lochman

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kočiš

BRNO 2020



## **Zadání diplomové práce**

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Vít Lochman
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Petr Kočíš
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Konstrukce jednokolového mobilního robotu se schopností skákání**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Úkolem studenta je navrhnout jednokolový mobilní robot s možností skákání pro průjezd složitějším terénem s možností sběru vzorků o maximální hmotnosti 2 kg.

#### **Cíle diplomové práce:**

Rešerše v oblasti mobilních robotů.

Nejméně 3 návrhové varianty, jejich zhodnocení a výběr vhodné varianty pomocí multikriteriální analýzy.

Konstrukční návrh vybrané varianty.

Potřebné strojírenské výpočty. Kompletní výkresová dokumentace.

Ekonomické zhodnocení.

Závěr a doporučení pro praxi.

#### **Seznam doporučené literatury:**

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

-----  
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

-----  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí jednokolového mobilního robotu se schopností skákání a sběru vzorků o hmotnosti 2 Kg. První část práce je věnována řešení v oblasti jednokolových robotů a jejich balančních mechanismů. Následuje stručný popis jízdy na jednom kole a skákacích mechanismů. Druhá část je věnována analýze problému a návrhovým variantám, z nichž byla vybrána optimální varianta za pomoci multikriteriální analýzy. Třetí část se věnuje dynamickým výpočtům a samotné konstrukci robotu. Závěr je věnován ekonomickému zhodnocení a diskusi nad možným pokračováním ve vývoji. Součástí práce je kompletní výkresová dokumentace všech částí robotu.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the design of a single-wheel mobile robot, which is able to jump and collect samples weighing 2 Kg. The first part is devoted to the review of single-wheel robots. A brief analysis of single-wheel motion and a brief overview of jumping mechanism follow up. The second part describes problem analysis and five design variants. Using the multi-criteria analysis, the variants were evaluated, and the optimal variant was chosen. The third part is dedicated to the dynamic calculations and the mechanical design of the robot itself. The last part is devoted to economic evaluation and discussion with possible continuation in developing. The complete drawing documentation of the robot is included in this work.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mobilní robot, jednokolový robot, skákací robot, gyroskop

## **KEYWORDS**

Mobile robot, single-wheel robot, jumping robot, gyroscope



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LOCHMAN, Vít. Konstrukce jednokolového mobilního robotu se schopností skákání. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121608>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Petr Kočíš.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Kočišovi za ochotu a cenné rady při vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat své manželce a rodině za neutuchající podporu během studia.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že diplomová práce na téma Konstrukce jednokolového mobilního robotu se schopností skákání je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Kočiše a s použitím odborné literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Lochman Vít



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
1.1	Historie.....	16
1.2	Mobilní roboty .....	17
<b>2</b>	<b>JEDNOKOLOVÉ MOBILNÍ ROBOTY .....</b>	<b>19</b>
2.1	Robotická emulace jízdy člověka na jednokolce .....	21
2.2	Jednokolový robot s horizontálním i vertikálním reakčním diskem.....	22
2.3	Jednokolový robot s kolem ve tvaru rugby balonu .....	22
2.4	Gyrover .....	23
2.5	Jednokolový robot stabilizovaný pákou uvnitř kola .....	26
2.6	Jednokolový robot stabilizovaný pákou vně kola.....	26
2.7	Jednokolový robot stabilizovaný posuvnou tyčí.....	27
2.8	Air Blowing Control .....	27
2.9	GYROBO.....	28
2.10	Jednokolový robot se dvěma horizontálními gyroskopy .....	29
2.11	Jednokolový robot se dvěma vertikálními gyroskopy .....	30
2.12	Honda U3-X.....	31
2.13	Jednokolový robot stabilizovaný Lorentzovou silou .....	31
<b>3</b>	<b>JÍZDA NA JEDNOM KOLE .....</b>	<b>33</b>
3.1	Stabilizování jednokolky .....	33
3.2	Metody zatáčení .....	34
3.3	Stabilita .....	34
<b>4</b>	<b>SKÁKACÍ MECHANISMUS MOBILNÍCH ROBOTŮ .....</b>	<b>35</b>
4.1	Skákací mechanismus inspirovaný kobylkou .....	36
4.2	Skákací mechanismus inspirovaný žábou.....	36
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ REŠERŠE .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>SYSTÉMOVÝ ROZBOR .....</b>	<b>39</b>
6.1	Problémová situace .....	39
6.2	Formulace problému .....	39
6.3	Formulace cílů a řešení .....	39
6.4	Diagram postupu práce .....	40
6.5	Reprezentativní parametry .....	41
6.6	Popis řešené soustavy .....	42
6.7	Systém podstatných veličin .....	42
<b>7</b>	<b>NÁVRHOVÉ VARIANTY .....</b>	<b>44</b>
7.1	Varianta B1 .....	44
7.2	Varianta B2.....	46
7.3	Varianta S1 .....	47
7.4	Varianta S2 .....	48
7.5	Varianta S3 .....	49
<b>8</b>	<b>MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA VARIANT .....</b>	<b>51</b>
8.1	Výběr reprezentativních parametrů .....	51
8.2	Přřazení váhy reprezentativním parametrům.....	51
8.3	Varianta B1 .....	53
8.4	Varianta B2 .....	54

8.5	Varianta S1 .....	55
8.6	Varianta S2 .....	56
8.7	Varianta S3 .....	57
8.8	Závěr multikriteriální analýzy .....	57
<b>9</b>	<b>TECHNICKÉ VÝPOČTY .....</b>	<b>59</b>
9.1	Seznam vstupních parametrů do simulace .....	60
9.2	Proces simulace .....	62
9.3	Výpočty pohonů .....	65
9.4	Výstupy ze simulace .....	71
<b>10</b>	<b>KONSTRUKCE ROBOTU .....</b>	<b>72</b>
10.1	Konstrukce balančního mechanismu .....	73
10.2	Konstrukce skákacího mechanismu .....	74
10.3	Konstrukce opěrného mechanismu .....	75
10.4	Konstrukce rámu a lokomočního ústrojí robotu .....	75
10.5	Konstrukce manipulačního mechanismu .....	77
10.6	Elektronika .....	78
<b>11</b>	<b>VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE .....</b>	<b>79</b>
<b>12</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>81</b>
<b>13</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>83</b>
13.1	Možné pokračování .....	83
13.2	Využití v praxi .....	83
<b>14</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>85</b>
<b>15</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>87</b>
<b>16</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>91</b>
16.1	Seznam zkratk a symbolů .....	91
16.2	Seznam tabulek .....	94
16.3	Seznam obrázků .....	94
<b>17</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>97</b>

# 1 ÚVOD

Pozemní lokomoce může být rozdělena na kvazi-statickou a dynamickou. Kvazi-statická rovnováha znamená, že projevy setrvačných sil související s akcelerací jsou dostatečně malé na to, aby se daly ignorovat, takže může být předpokládána statická rovnováha. Stabilita kvazi-statických systémů spočívá v nasměrování gravitačního vektoru, vedoucího skrz těžiště, do prostoru mezi vazbami vozidla se zemí. Vstupní energie je převážně využita na reakci proti statickým silám. Takové systémy mohou být obvykle řízeny na základě kinematických úvah.

V dynamické lokomoci vstupují do hry setrvačné síly. Význam dynamických účinků se zvyšuje, když je rychlost vysoká, gravitace slabá a dynamické narušování (například v hrubém terénu) vysoké. Velké množství energie je spotřebováváno na kontrolu momentu systému.

Při neustále se posouvajících limitech mobilních robotů, vstupují dynamické účinky stále významněji do hry. Robotické systémy, které dokáží pracovat s dynamickými účinky, jsou schopny využít moment ke zlepšení mobility, jak může být demonstrováno na četných člověkem ovládaných systémech: gymnastika, atletika, tanec nebo krasobruslení.

Je paradoxní, že tytéž faktory, které umožňují statickou stabilitu mohou být v rozporu se stabilitou dynamickou. Například čtyřkolový automobil, který má velmi nízko těžiště a široký rozvor náprav i rozchod kol, tudíž disponuje velkým prostorem mezi jednotlivými vazbami se zemí, je staticky velmi stabilní. Když však toto vozidlo přejíždí přes hrubý terén, síly od nárazů vyvíjí na vozidlo velké momenty, neboť rozlehlý prostor mezi vazbami, který byl kardinální pro dosažení statické stability, poskytuje také velký pákový mechanismus pro vyvinutí momentu, který narušuje dynamiku vozidla. Takto se může vozidlo stát nestabilní ve všech osách.

Navíc, je potřeba, aby jednotlivé vazby se zemí za všech okolností korespondovaly s konturou povrchu dynamicky i staticky, k tomu byly vyvinuty sofistikované systémy aktivního a semi-aktivního odpružení, které minimalizují dynamické narušování, jsou však velkou energetickou zátěží a nesou sebou další úskalí. Jednodušší pasivní odpružení vozidla zase snižuje stabilitu tím, že může dovolit gravitačnímu vektoru, aby byl nasměrován mimo prostor mezi vazbami se zemí.

Jako druhý příklad uvažujme motocykl, který má dvě kola za sebou. Takový stroj je staticky nestabilní kolem podélné horizontální osy, ale nabývá dynamické stability při pohybu, kvůli náležité geometrii systému řízení a gyroskopickému efektu řízeného předního kola. Stabilita řízení se zvyšuje s rychlostí kvůli gyroskopickému efektu. Dynamické síly na kontaktu kolo-země mají působiště blízko středové předozadní roviny vozidla a proto produkují minimum rušení v podélné horizontální ose. Navíc motocykl zůstává na rozdíl od automobilu vzpřímený i při jízdě na svahu po vrstevnici.

Z výše popsaného vyplývá, že když při konstrukci mobilních robotů obětujeme statickou stabilitu, a tím i nižší energetickou náročnost za klidu vozidla, získáme mnohem vyšší dynamickou stabilitu, lepší schopnost průjezdu terénem a všeobecně vyšší míru obratnosti.

Jako logické rozšíření tohoto argumentu uvažujme pouze jedno kolo jedoucí dolů ze svahu. Při působení gravitace, gyroskopický efekt způsobí na kole precesi okolo vertikální osy a kolo zatáčí ve směru, v němž se naklápí, místo aby spadlo, jako je tomu, když je v klidu.

Výsledný pohyb po kružnici vyvíjí odstředivou sílu, která zase rovná kolo do vzpřímené polohy. Dynamická narušení při jízdě hrubým terénem působí skrz nebo blízko těžiště kola, takže vyvíjí minimum momentu k převrácení v jakékoliv ose. Moment setrvačnosti kola navíc kvůli gyroskopickému efektu stabilizuje kolo. Jedno kolo je navíc necitlivé vůči jízdě do svahu ze svahu nebo po vrstevnici. To dělá jednokolovou koncepci jednou z nejstabilnějších koncepcí vozidla vůbec.

## 1.1 Historie

Historie jednokolového vozidla sahá až do roku kdy si R.C. Hemmings nechal patentovat Velosipede (Obr. 1). Ten se skládal z velkého kola, v němž byl umístěn řidič, ručně jej poháněl ručně pomocí kliky. V roce 1935 vyšla publikace, která popisovala Dyno-Wheel (Obr. 2), koncept s podvozkem podobným autobusu, který obklopovalo velké centrální kolo.

Velký průměr kola zvyšuje schopnost překonávání překážek, plynulost pohybu a účinnost valení. Dále může jednokolové vozidlo snadněji najít bezbariérové cesty a úzký profil může zlepšit manévrovatelnost. Avšak problémy s řízením, stabilita v nízkých rychlostech a aerodynamika držely tato vozidla daleko od aplikace do běžné praxe. [1]



HEMMINGS' UNICYCLE OR FLYING YANKEE VELOCIPED.

Obr. 1) Velosipede [2]





Obr. 2) DYNO-WHEEL [3]

## 1.2 Mobilní roboty

Robot je automatický nebo počítačem řízený stroj s určitou mírou autonomie, který je schopný interakce s prostředím dle instrukcí od člověka. Zvláštním druhem robota je průmyslový robot, což je víceúčelové zařízení s vlastním pohonem manipulačních mechanismů, vykonávajících variabilní řízené pohyby dle pružných řídicích programů řídicího systému a informací senzorů pro zajištění vzájemného působení robota a technologického prostředí. Je určen pro automatickou operační a mezioperační manipulaci s obrobky a materiálem u výrobních strojů a pro uskutečňování technologických operací.

Všechny typy robotů bychom mohli rozdělit na stacionární a mobilní. Stacionární průmyslové roboty jsou již od 70. let minulého století hojně využívány v průmyslové praxi. Úplně první průmyslový robot uvedený do praxe se jmenoval UNIMATE, byl dán do provozu v roce 1961 u firmy General Motors. Nevýhodou stacionárních průmyslových robotů je omezenost pracovního prostoru dosahem jejich manipulačních ramen.

Mobilní roboty jsou na rozdíl od stacionárních schopny se přemisťovat v prostoru, k čemuž mají uzpůsobené vlastní nesené zdroje energií a svou vlastní nesenou senzorickou a řídicí soustavu. Tyto roboty jsou stále ve vývoji a jejich použití v praxi ještě nemá takovou tradici – zejména díky vysoké ceně řídicích systémů a senzorů a nedostatečné kapacitě baterií. Typické aplikace mobilních robotů jsou například ve člověku nebezpečných prostředích nebo ve vnitropodnikové logistice. [4]

Mobilní (lokomoční) roboty lze dělit dle několika kritérií. Mezi základní patří rozdělení na autonomní a dálkově řízené. Autonomní roboty jsou navrženy pro činnosti v neznámých, či známých ale měnících se prostředích. Využívají sofistikované rozhodovací procesy a adaptivního nebo supervizního řízení. Tyto roboty se dnes běžně zvládají vyhýbat náhodným překážkám, dokáží projíždět terénem, samy se stabilizují po náhodném vnějším mechanickém zásahu nedestruktivního charakteru nebo těmto kolizím dokonce dokáží předcházet. Příkladem firmy zabývající se těmito typy robotů je Boston Dynamics (Obr.3).

Dálkově řízené roboty jsou řízeny operátorem, na základě jeho přesných instrukcí jsou schopny vykonávat určité činnosti. [4]

Dále můžeme mobilní roboty rozdělit dle prostředí, ve kterém se pohybují, na roboty pohybující se na souši (indoor/outdoor), ve vodě, ve vzduchu nebo ve vesmírném prostoru.

Také dle účelu na servisní, inspekční, montážní, manipulační, průzkumné, zdravotnické, vojenské nebo pro zábavu.

Roboty pohybující se po souši můžeme dále dělit na kráčivé, pásové, kolové, plazivé, skákající, šplhající. Kolové roboty pak můžeme ještě dále rozdělit na jednokolové, dvoukolové, tříkolové, čtyřkolové, šestikolové, osmikolové a speciální konstrukce. [5]



Obr. 3) Mobilní roboty od firmy Boston Dynamics [6]

## 2 JEDNOKOLOVÉ MOBILNÍ ROBOTY

Koncept rovnováhy je důležitý pro naše životy, neboť naše vlastní těla jsou systémy, které jsou schopny udržet rovnováhu; stát a vzpřímeně chodit. Techniky pro dosažení a udržení rovnováhy jsou hojně využívány i v průmyslových aplikacích. Výskyt nerovnováhy v pohybujících se součástech často tvoří vážné problémy, zejména kvůli vibracím.

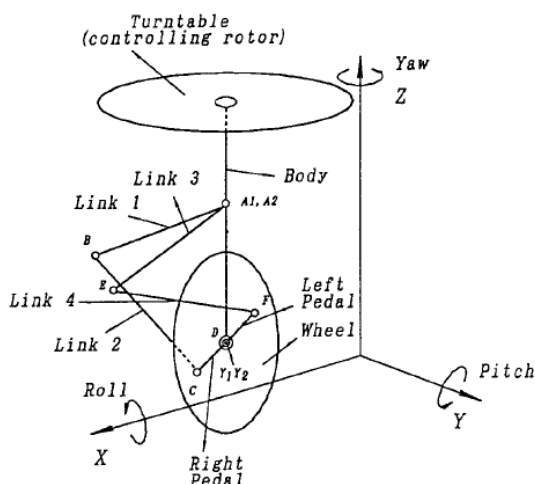
Jednou z typických aplikací balančních systémů je systém obráceného kyvadla. Dvoukolový systém obráceného kyvadla je kombinací obráceného kyvadla a mobilního robotu. Dvoukolové mobilní roboty užívají balanční mechanismus k tomu, aby měly výhody mobility a manévrovatelnosti v omezených prostorech.

Mnohem větší výzvou v oblasti balančních systémů je snížit počet kol na jedno. Jednokolový robot má pouze jedno kolo, kterým se dotýká země, a které užívá k balancování i k jízdě. [7]

V počátku jednokolové mobilní robotiky se vědci pokoušeli sestavit robota, který by napodoboval jízdu člověka na jednokolce. Společným znakem těchto robotů je horizontální otočný disk, který svým otáčením uděloval systému moment a napodoboval tak natáčení torza jezdce (Obr. 4).

Jiným příkladem jak vyvážení jednokolového robota je použití vertikálního reakčního kola. Rotace reakčního kola ve směru převrácení vyvolá setrvačné síly sloužící k vyrovnání rovnováhy. K regulaci rovnováhy jsou tedy využívány setrvačné síly.

Další zajímavý koncept využíval tlakovou sílu proudícího vzduchu pro udržení rovnováhy a byl představen pod názvem CNU Blower. Turbíny jsou používány ke generování síly proudícího vzduchu proti směru převrácení. Regulaci rychlosti otáčení turbín se řídí síla proti směru převrácení.



Obr. 4) Jednokolový robot s horizontálním diskem [8]

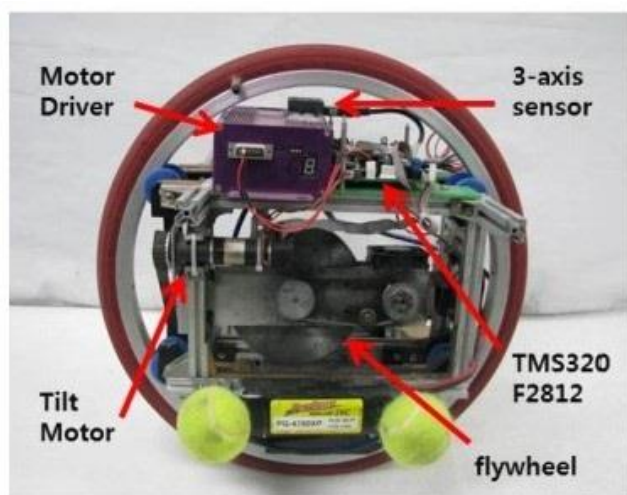
Jedním z nejúspěšnějších způsobů jak stabilizovat jednokolového robota je gyroskop. Například Gyrover je jednokolový robot vyvinutý v Carnegie Mellon University. Tato průkopnická práce inspirovala spoustu vědců na světě. Řízení takového robota je však velmi náročné, protože se dotýká země jen jedním bodem. Gyroskopický efekt byl použit pro vyvinutí balanční síly a pro udržení stále vzpřímené polohy.

Na gyroskopickém efektu byl založený i GYROBO vyvinutý na Chungnam National University. První generace GYROBO byla úspěšná v udržování rovnováhy na místě, ale selhala při pohybu vpřed. Problém byl zejména v konceptu, kdy všechny součásti robota měly být umístěny uvnitř kola. Vibrace od setrvačníku nebyly redukovány a rušily senzory. Navíc přívod elektřiny byl vyveden mimo systém, takže robot nelze považovat za úplně mobilní.

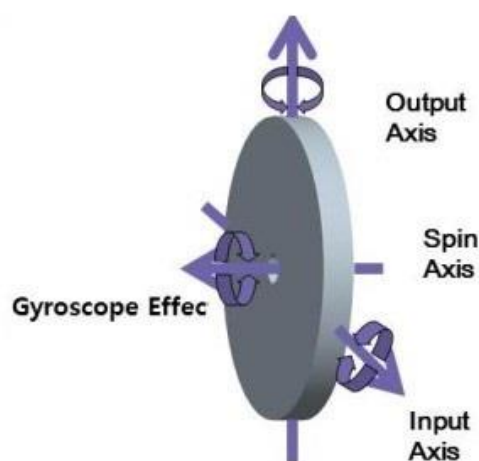
Druhá generace GYROBO, která je zobrazena na Obr. 5a, byla upravena, tak aby byl zdroj energie uvnitř kola. Konstrukční úpravy se týkaly zejména redukce vibrací. GYROBO II se dokázalo úspěšně pohybovat a udržovat rovnováhu, avšak pouze omezenou dobu, kvůli kinematické omezenosti uložení gyroskopu (Obr. 5b). Při vyrovnávání rovnováhy se systém naklápění gyroskopu začne otáčet v jednom směru, aby předešel převrácení robota. Pokud by ale robot dlouho padal na jednu stranu, musel by se otáčet pořád v jednom směru, což nakonec vyústí v převrácení, protože systém je kinematicky omezený a nedokáže se otáčet neustále.

Jako řešení se ukázalo navrhnout gyroskopický systém tak, aby se nemusel otáčet dlouho pouze v jednom směru. Toho bylo docíleno až po přesném matematickém popsání vztahu mezi regulací úhlu naklonění gyroskopu a úhlu naklonění robota. [9]

V následujících kapitolách jsem se pokusil podat chronologicky seřazený přehled jednotlivých přístupů k problematice jednokolové robotiky.



a)



b)

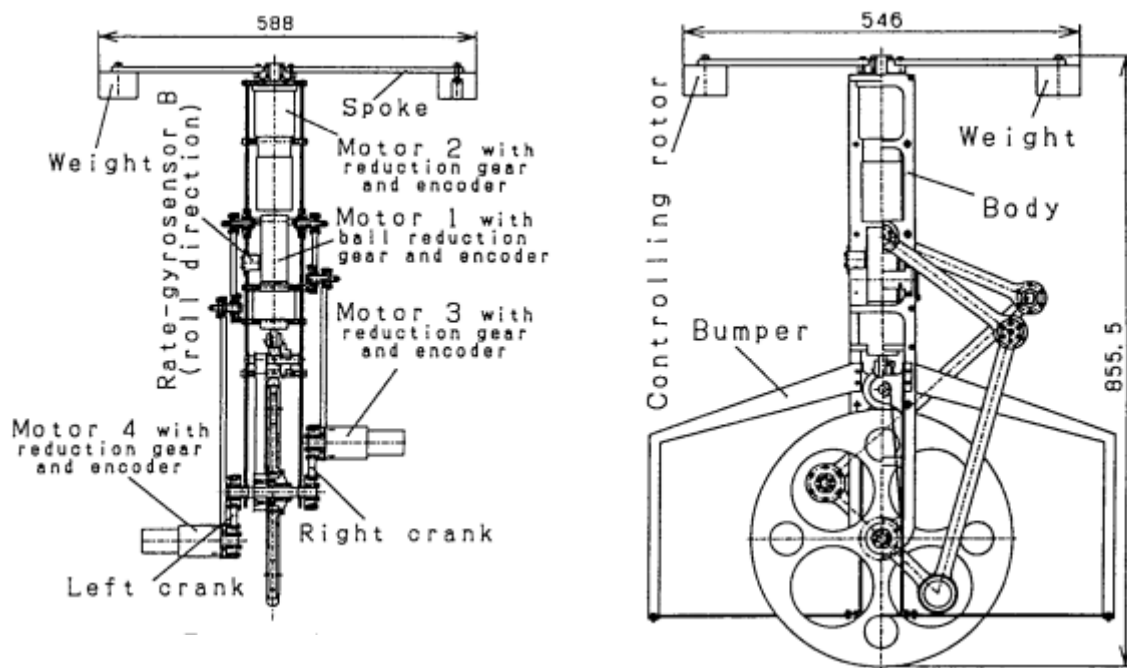
Obr. 5) a) GYROBO II, b) Popis funkce gyroskopu v robotu GYROBO [10]

## 2.1 Robotická emulace jízdy člověka na jednokolce

Za průkopnickou práci v oblasti jednokolové mobilní robotiky lze považovat práci C. Ozaka a kolektivu z roku 1980 *Stability of a monocycle-type inverted pendulum, third vehicle automation*. V této práci byl navrhnout jednokolový robot, který kontroluje svou rovnováhu v horizontální příčné ose samotným pohybem kola a v horizontální podélné ose se tak děje přesunem závaží (změnou polohy těžiště).

V následující práci z roku 1987 od A. Schoonwinkela *Design and Test of a Computer Stabilized Unicycle* byly analyzovány pohyby člověka jedoucího na jednokolce, načež byl vytvořen koncept jednokolového robotu, který co nejvěrněji napodobuje jezdcovy pohyby. Jádrem konceptu je otočný horizontální disk, umístěný ve vrchní části robotu, tak aby mohl systému udělovat moment kolem vertikální osy. Tento systém však z principu nemůže zůstat vzpřímený při nulové rychlosti. Navíc v práci není zmínka o žádném experimentálním ověření předložených teorií.

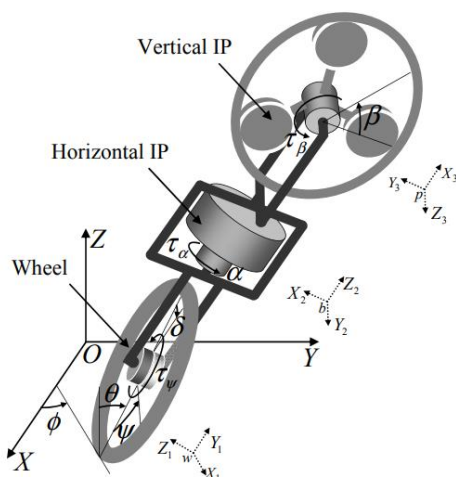
Dále pánové Sheng a Yamafuji z Japonska v roce 1995 vypracovali studii jízdy člověka na jednokolce a navrhli a sestrojili robota který emuluje lidskou jízdu na jednokolce. Součástí jejich konceptu byl také horizontální otočný disk, který slouží jako natáčející se torzo jezdce (Obr. 6). Pro celý svůj koncept vypracovali matematický model, který byl následně porovnán s chováním robotu při experimentálních zkouškách. [8]



Obr. 6) Jednokolový robot dle Shnega a Yamafuji [8]

## 2.2 Jednokolový robot s horizontálním i vertikálním reakčním diskem

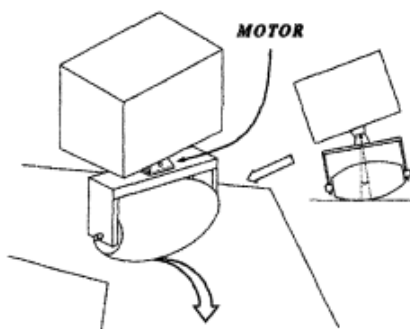
Robot pracuje na principu obráceného kyvadla, které je řízeno jednak točivým momentem pohonného kola a jednak horizontálním a vertikálním otáčejícím se diskem, které udělují celému systému moment tak, aby nespadl (Obr.7). Tento koncept byl experimentálně ověřen na reálném modelu, jeho řízení je však velmi komplikované, protože jednotlivé momenty se navzájem ovlivňují a elektrické pohony při stabilizaci často naráží na své limity - systém se tak může stát velmi rychle nestabilní. [11]



Obr. 7) Jednokolový robot s horizontálním a vertikálním diskem [11]

## 2.3 Jednokolový robot s kolem ve tvaru rugby balonu

Tvar kola tohoto robota připomíná balon pro rugby. Tento tvar pomáhá udržet stabilitu v příčném směru. Robot se dokáže chovat jako panáček vstáváček, pokud je těžiště níž, než střed poloměru kola, který bychom viděli v řezu osou kola. V tomto případě je principiálně robot stabilní v příčném směru. V praxi bylo těžiště přemístěno o trochu výš a stabilita byla dosažena řízením. Dalším charakteristickým znakem je, že robot je rozdělen do dvou částí; horní a dolní. Mezi horní a dolní částí je aktuátor ke stabilizaci robota v příčném směru a natáčení těla. Při natáčení horní části těla se přemísťuje poloha těžiště robota a takto robot zatáčí. Stabilizace v podélném směru je dosažena přímo hlavním pohonem kola. Robot je vybaven třemi gyroskopy, které měří úhlovou rychlost ve všech třech osách. [12]



Obr. 8) Jednokolový robot s kolem ve tvaru rugby balonu [12]



## 2.4 Gyrover

Gyrover (Obr. 9) je jednokolový gyroskopicky stabilizovaný mobilní robot vyvinutý na Carnegie Mellon University. Celý mechanismus je umístěn uvnitř jednoho kola na kyvadlu a to včetně motoru, který zajišťuje pohyb vpřed a vzad, a velkého gyroskopu na naklápěcím mechanismu, který se stará o rovnováhu v pomalých rychlostech a zatáčení. Koncept jednokolového robota stabilizovaného gyroskopem byl originálně navržený Brownem a Xu.

Idea spočívá ve výhodě dynamické stability jednokolové koncepce rozšířené gyroskopem, který ovlivňuje zatáčení a stabilitu v pomalých rychlostech tím, že dokáže natočit robota kolem jeho vertikální osy.

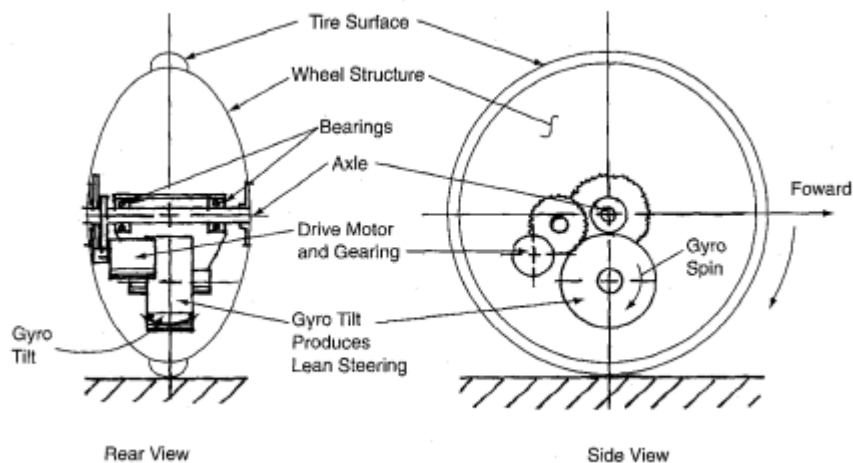
Samostabilizační dynamika jednokolové koncepce může být popsána takto: Představme si jednokolového robota jedoucího z kopce. Když se kolo nakloní do boku, gyroskopická precese způsobí, že zatočí tím směrem, kterým se naklání a odstředivá síla vyplývající ze zakřiveného pohybu zase narovná kolo.

Gyrover byl původně ovládán dálkovým ovladačem, který umožňoval měnit napětí na pohonném motoru a úhel natočení naklápěcího mechanismu. Tímto způsobem bylo možné robota ovládat, tedy za předpokladu, že operátor viděl jak se robot chová a na základě naučeného cítění mu dával správné příkazy. Bylo však téměř nemožné ovládat robota, když nebyl v operátorově dohledu. Proto bylo třeba vyvinout spolehlivé řízení, které by robota ovládalo.

Gyrover může stát na místě a otáčet se, vyjíždět mírné kopce a být stabilní při rychlé jízdě i v náročných terénech a může být kompletně zakrytovaný a tak chráněný před nepříznivými vlivy prostředí. Gyrover se skládá ze čtyřech hlavních částí: Kolo, kyvadlo, naklápěcí mechanismus, gyroskop (Obr. 10).



Obr. 9) GYROVER [13]

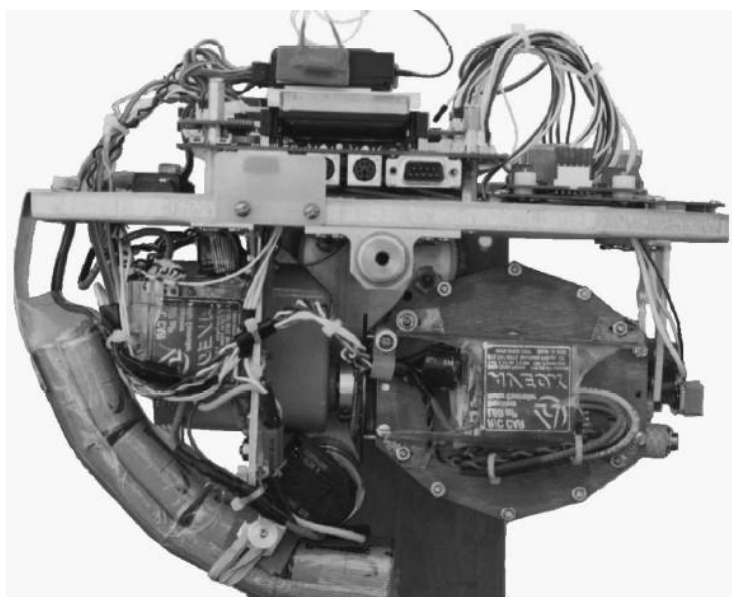


Obr. 10) Funkční schéma Gyroveru [1]

**Pneumatika a kolo:** Kolo je jedinou částí, které je v přímém kontaktu s prostředím. Skládá se z ráfku a dvou polykarbonátových kopulí, které propojují ráfek s osou otáčení.

**Kyvadlo:** celé hlavní tělo Gyroveru (Obr. 11) visí jako kyvadlo na ose otáčení hnacího kola. Kyvadlo obsahuje DC motor a převodovku (formou ozubeného klínového řemene) pro pohon hřídele kola. Tento kyvadlový systém, zakomponovaný uvnitř kola, využívá gravitaci, aby udržovala těžiště robotu nízko a zároveň působila jako reakce proti momentu pohonného motoru.

**Gyroskop:** Gyroskop je srdcem Gyroveru. Moment setrvačnosti rotující hmoty zajišťuje stabilitu a referenční systém, vůči němuž může být Gyrover naklopen. Gyroskop je v krytování ze sklolaminátu a slitiny hliníku, rotující na přesných kuličkových ložiscích a namontovaný v gumových izolačních silentblocích. Integrovaný DC bezkartáčový motor roztáčí gyroskop na provozní rychlost, jejíž hodnota je přesně 15 000 otáček za minutu.



Obr. 11) Vnitřní části Gyroveru [14]



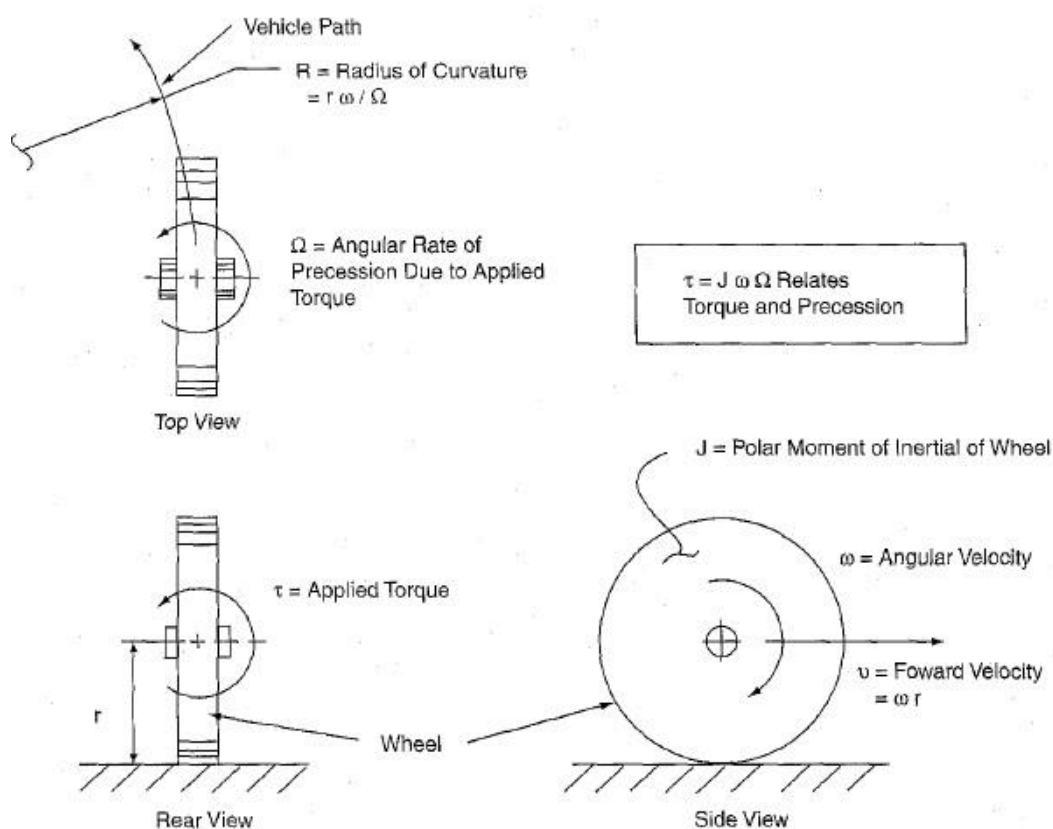
**Naklápěcí servo:** Celým gyroskopem lze naklápět pomocí naklápěcího serva. To přesně řídí úhel naklonění gyroskopu na ose která je kolmá k ose otáčení kola a je situována pod touto osou. Servo má vysoký točivý moment, aby bylo schopno natočit s roztočeným gyroskopem a tím ovládalo naklonění celého robota. Tento točivý moment vyvažující robota, vede k otáčení kolem vertikální osy a způsobuje efekt zatáčení (Obr. 12). Například když je rychlost vpřed nulová, můžeme Gyroverem rotovat doleva nakloněním kola doleva. Gyroskopický efekt zastaví padání Gyroveru a zároveň vyvolá pozitivní rotaci okolo vertikální osy, která otáčí robotem doleva.

**Elektronika:** Řídící obvod se skládá z mikrokontroleru a flashdisku, rozhraní pro rádiový systém a serva, komponenty a logiku řízení pro pohony a rozhraní pro senzory.

**Senzory:** Na Gyrover byly instalovány následující senzory:

- Potenciometr měřící úhel naklonění Gyroskopu.
- Optický enkodér pro měření rychlosti pohonu a jeho polohy.
- Hallova sonda pro měření momentu setrvačnosti gyroskopu.
- Třiosý gyroskop pro měření momentu setrvačnosti kyvadla.

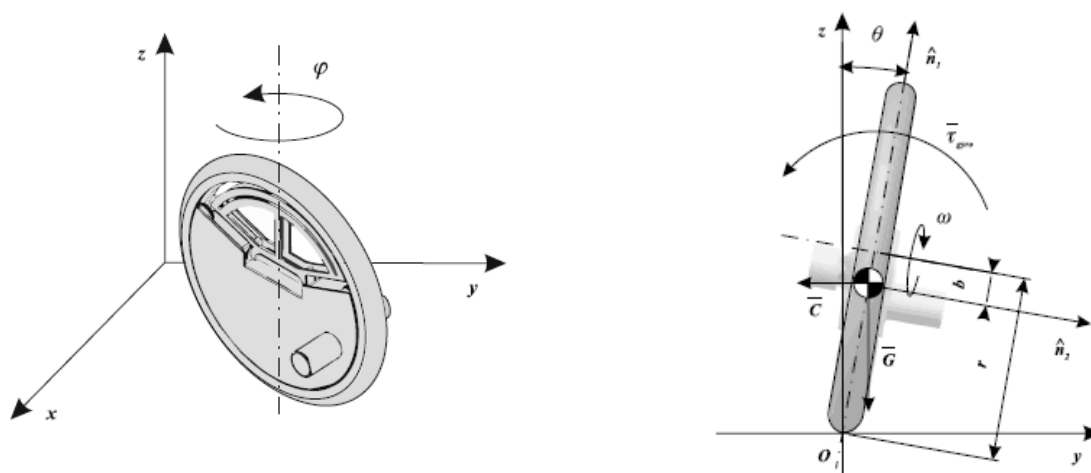
**Baterie:** Baterie obsahuje osm 2800 mAh Nikl-Kadmiových článků a olověnou konzolu pro snížení těžiště. Články baterie mohou být nabity na 5A zdroji za 45 min, pak je možné přístroj 20 minut používat. [14]



Obr. 12) Kinematika zatáčení Gyroveru [1]

## 2.5 Jednokolový robot stabilizovaný pákou uvnitř kola

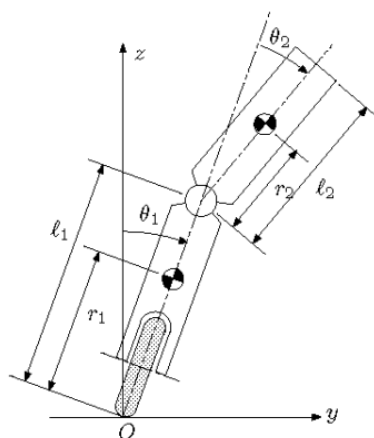
Koncept je inspirován jednokolovým motocyklem, který se skládá z velkého kola v němž sedí řidič (Obr.1). Všechny části tohoto robotu jsou umístěny uvnitř kola, tato koncepce chrání všechny části robotu proti poškození a je výhodná při jízdě hrubým terénem. Koncepce je podobná Gyroveru, avšak vyhýbá se gyroskopu, který je náročný na spotřebu elektrické energie. Místo toho je balanční mechanismus vytvořen za pomoci naklápěcí páky napojené na servo motor, která svým natáčením mění polohu těžiště robotu (Obr. 13). Robot využívá balančního mechanismu když stojí, nebo jede velmi pomalu. Při vyšších rychlostech zajišťuje balanční mechanismus změnu směru jízdy. Nevýhodou této koncepce je nemožnost otočení kolem vertikální osy při nulové rychlosti a také omezený úhel naklonění, který je ještě možné vyvážit. Naproti tomu Gyrover se dokáže opětovně postavit na kolo i při pádu na bok. [15]



Obr. 13) Jednokolový robot stabilizovaný pákou uvnitř kola [15]

## 2.6 Jednokolový robot stabilizovaný pákou vně kola

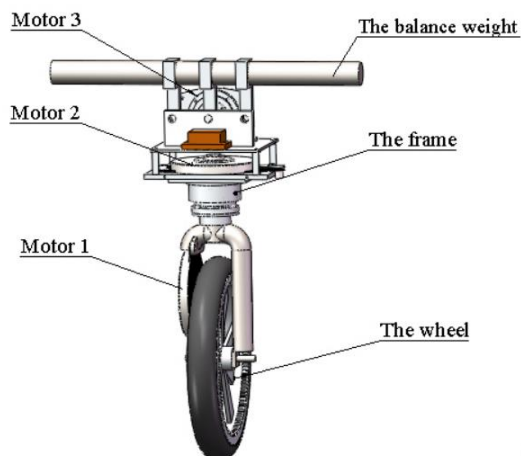
Tento koncept funguje velmi podobně jako předchozí, akorát že pákový mechanismus není schovaný uvnitř kola, ale vně (Obr. 14). Autoři tvrdí, že jde o low-cost variantu jednokolových robotů. [16]



Obr. 14) Jednokolový robot stabilizovaný pákou vně kola [16]

## 2.7 Jednokolový robot stabilizovaný posuvnou tyčí

I tento robot se vyhýbá gyroskopickému efektu a je řízen přenášením váhy balanční posuvné tyče v horní části robotu (Obr. 15). Takto je přesunuta poloha těžiště a robot může udržet rovnováhu, respektive zatáčet. Nevýhodou je omezený úhel naklonění. [17]



Obr. 15) Jednokolový robot stabilizovaný posuvnou tyčí [17]

## 2.8 Air Blowing Control

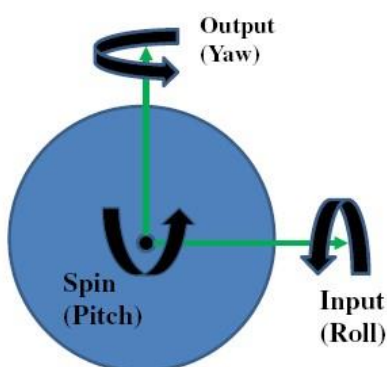
Tato koncepce jednokolového robotu ukázala další možný styl řízení úhlu naklonění podle horizontální osy kolmé na osu hlavního kola. Úhel je řízen pomocí dvou dmychadel umístěných ve vrchní části robotu (Obr. 16). Pro minimalizaci vzájemného rušení jsou dmychadla oddělena a řízena zvlášť lineárními kontroléry. Úhel natočení kolem horizontální osy rovnoběžné s osou pohonného kola je potom řízen točivým momentem pohonného motoru. Tento robot se skládá z kola, dvou dmychadel, dvou chapadel, DC motoru a hardware pro řízení. Byl řízen dálkově přes joystick a jeho schopnost balancovat při jízdě vpřed a vzad byla experimentálně ověřena. [18]



Obr. 16) Jednokolový robot stabilizovaný dmychadly [18]

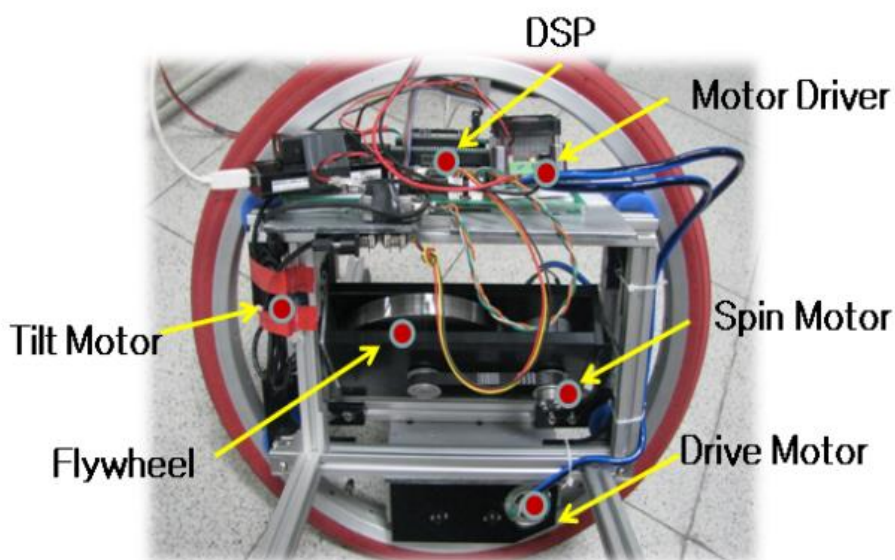
## 2.9 GYROBO

Gyrobo je jednokolový robot vyvinutý na jihokorejské univerzitě Chungnam National University. Robot má tři pohony pro pohyb vpřed a vzad a pro udržení rovnováhy. Dva z pohonů pohánějí naklápěcí gyroskop, který dopomáhá robotu k rovnováze (Obr. 17). Celý robot se skládá z motorů, setrvačníku, hardware a kola. Situování motorů v omezeném prostoru je velký problém když vezmeme v úvahu rozložení hmotnosti kvůli rovnováze. Velikost a hmotnost setrvačníku je také rozhodující pro generování dostatečné síly pro udržení rovnováhy celého robotu. Pohonný motor je připojen ke kolu, takže přímo ovlivňuje pohyb kola. Motor náklonu mění úhel působení gyroskopu. Vysokootáčkový motor pro pohon gyroskopu je připojen k setrvačníku pomocí klínového řemene (Obr. 18).



Obr. 17) Kinematika zatačení pomocí gyroskopu [19]

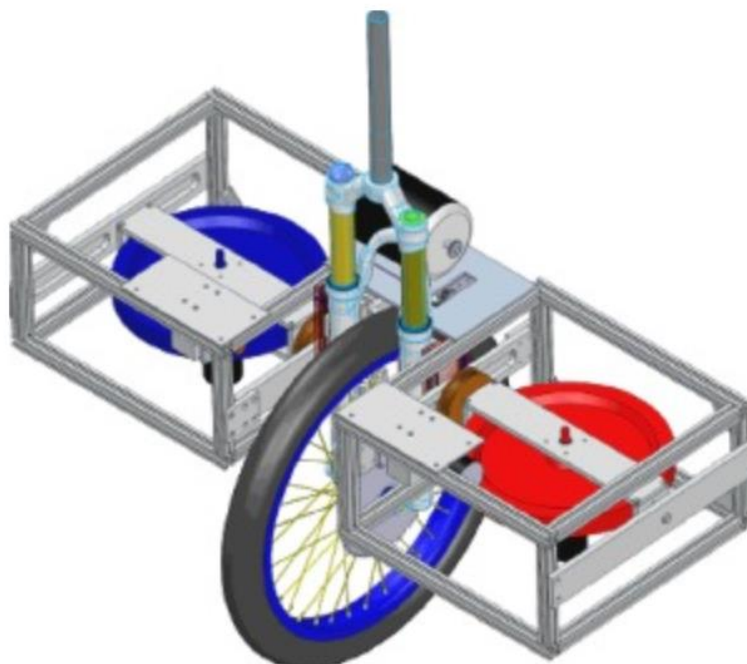
Hardware se skládá z DSP2812 a AVR, což jsou hlavní procesory a drivery pro pohony. Baterie nebyla u první generace součástí systému zejména kvůli nedostatku prostoru. Robot tedy nelze považovat jako úplně mobilní. [20]



Obr. 18) GYROBO I [20]

## 2.10 Jednokolový robot se dvěma horizontálními gyroskopy

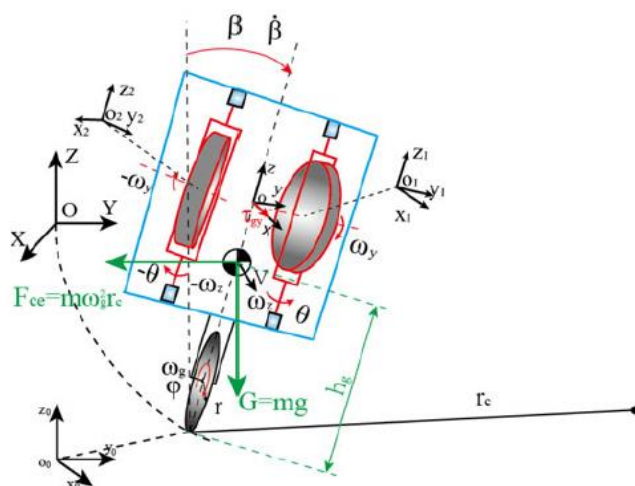
Výhodou gyroskopického řízení oproti řízení typu reakčního kola je vyšší celková hodnota točivého momentu stabilizačního mechanismu. Této vlastnosti si všimli odborníci na Asian Institute of Technology v Thajsku a pokusili se vyvinout vyšší točivý moment balančního mechanismu použitím dvou gyroskopů. Touto koncepcí je navíc řešen problém ve vzájemném skládání momentů pro řízení úhlu naklonění a rotace kolem vertikální osy, což je důležitý problém při řízení jednogyroskopické koncepce, kde je zapotřebí ho překonávat složitou fuzzy logikou. Dvougyskopové řešení je navrženo tak, aby tyto dva pohyby byly vzájemně odděleny a řízeny samostatně. Oba setrvačníky se točí stejnou rychlostí ale opačným směrem (Obr. 19). To znamená že vertikální precese je kompletně neutralizována když jsou osy setrvačnicků rovnoběžné. Protože je robot osazen dvěma gyroskopy, může být robot stabilizován v příčném směru a zároveň může zatačet. Výsledkem je, že úhel naklonění v příčném směru a směr jízdy robota může být kontrolován nezávisle. [21]



Obr. 19) Jednokolový robot se dvěma horizontálními gyroskopy [21]

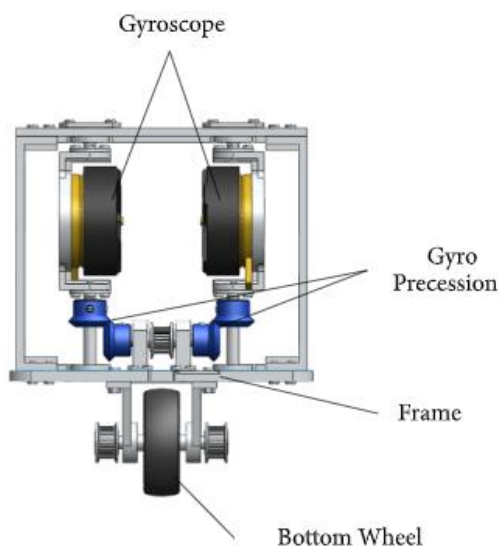
## 2.11 Jednokolový robot se dvěma vertikálními gyroskopy

Tato dvougyroskopová koncepce (Obr. 20, 21), tentokrát z Číny, se skládá ze dvou gyroskopů, které mají taktéž stejnou rychlost otáčení, ale opačný směr, takže se jejich působení navzájem vyruší, když jsou jejich osy otáčení rovnoběžné. Systém je navržen tak, aby nedocházelo ke skládání sil ovlivňujících rotaci kolem vertikální osy a horizontální osy a zároveň, aby docházelo k rychlé odezvě při řízení zatáčení.



Obr. 20) Schéma jednokolového robotu stabilizovaného dvěma vertikálními gyroskopy [22]

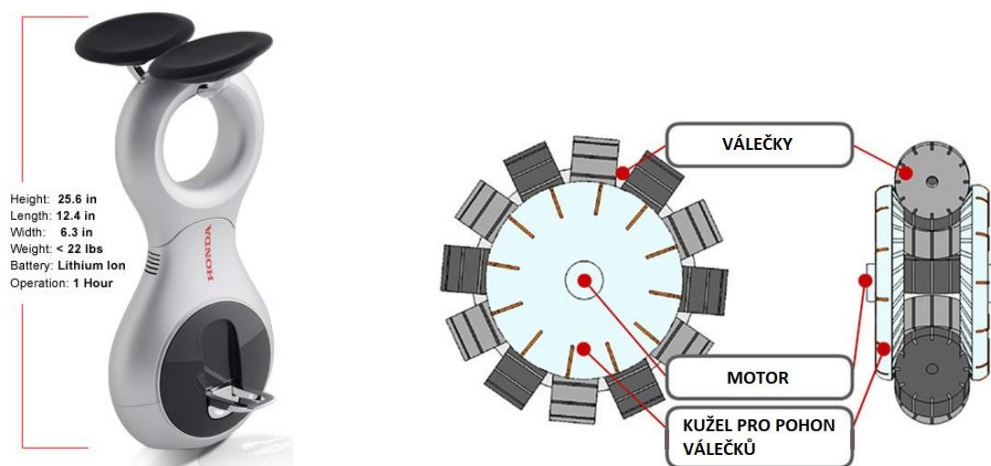
Zatáčení je v této koncepci řešeno regulací úhlové rychlosti otáčení kolem horizontální podélné osy. Koncepce předpokládá pohonné kolo jako gyroskop a úhel naklopení okolo horizontální podélné osy jako pohyb s gyroskopem (precese). Tato skladba momentů vyúsťuje v moment otáčející kolem vertikální osy robotu. S konstantní rychlostí pohonného kola může být úhel natočení kolem vertikální osy regulován řízením úhlové rychlosti otáčení robotu okolo horizontální podélné osy. [23]



Obr. 21) Jednokolový robot stabilizovaný dvěma vertikálními gyroskopy [23]

## 2.12 Honda U3-X

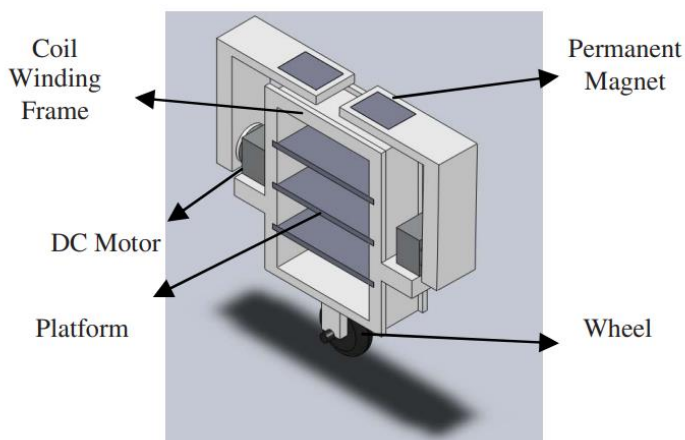
Dalším možným způsobem jak vyřešit nestabilitu jednokolového systému je využitím speciálního všesměrového kola jako u vozidla U3-X, které je vyobrazeno na Obr. 22. Toto kolo se skládá z velkého standardního kola na jehož obvodu jsou umístěny válečky, které mají osu kolmou k ose velkého kola. Pomocí tohoto systému se může robot pohybovat do stran, aniž by pohnul velkým kolem a tak balancovat při stání na místě. [24]



Obr. 22) Honda U3-X [25]

## 2.13 Jednokolový robot stabilizovaný Lorentzovou silou

Autoři této koncepce jednokolového robotu (Obr. 23) se chtěli vyhnout jak těžkopádnosti reakčních kol, tak vysoké spotřebě energie gyroskopů. Tento dosud nejnovější druh stabilizace byl inspirován Lorentzovou silou a principem dynama. Lorentzova síla je způsobena magnetickým polem, v němž mění směr pohybu nabitě částice. Elektrický proud procházející vodičem sestává z takto nabitých částic, které se pohybují. Lorentzova síla tedy působí na celý vodič dle vztahu  $F = IB \times l$ .



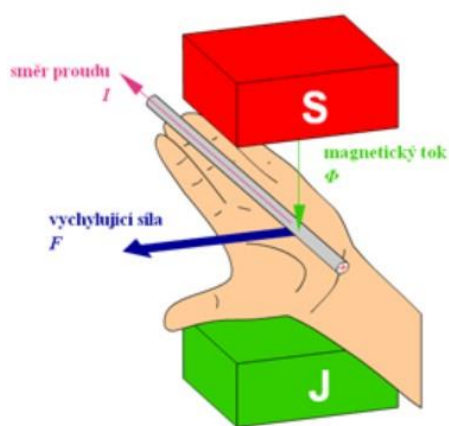
Obr. 23) Jednokolový robot stabilizovaný Lorentzovou silou [26]



Tento robot je opět postaven na principu vyvažování obráceného kyvadla. Skládá se z kola, rámu cívky, dvou DC motorů, dvou permanentních magnetů na ramenech a třech platform. Protože koncept byl použit pouze pro udržení statické rovnováhy, nebyl na kolo namontován žádný pohon. Na ose kola je připevněn rám cívky s vinutím, na němž jsou usazeny oba DC motory, uvnitř rámu jsou tři platformy pro řídicí logiku a baterie. Permanentní magnety jsou připevněny na dvou ramenech, kterými otáčí DC motory okolo vinutí cívky.

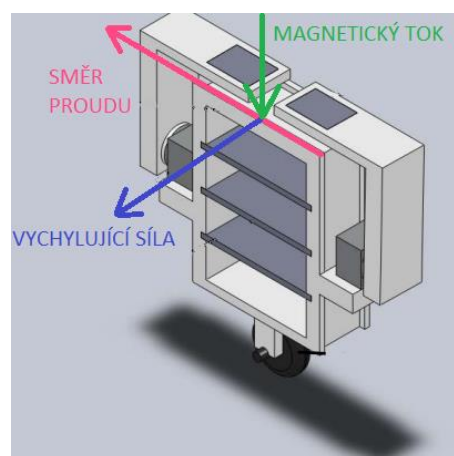
Reakční síla balancující robota je vyvozena z elektromagnetické indukce mezi magnetem a vinutím cívky na rámu. Dle Lorentzova zákona, aby bylo dosaženo maximální síly, směr proudu  $I$  by měl být kolmý na směr magnetické indukce  $B$ . Když jsou ramena s magnety přesně nahoře nebo dole, jsou reakční síly nejúčinnější. Nevýhodou je, že reakční síly vyvozené rameny nahoře a dole mají opačný směr. Aby se ale tyto síly daly využít, je zapotřebí izolovat spodní stranu robota elektromagnetickým izolantem. Směr Lorentzovy síly je potom dán směrem toku proudu v cívce, který je řízen kartáčky. Lorentzova síla je navíc přímo úměrná proudu, procházející cívkou, takže je relativně jednoduché ji řídit.

Tato koncepce byla experimentálně ověřena a bylo zjištěno, že je proveditelná. Při stacionárním vyvažování je dokonce energeticky skutečně méně náročnější než gyroskop nebo reakční disk. Výsledky měření ukazují, že jakmile robot nabude rovnováhu, odběr proudu se sníží téměř na nulovou hodnotu. Nevýhodou je, že magnetické pole, kterým je robot řízen ruší řídicí elektrické komponenty (například gyroskopický senzor). U tohoto robota také nebylo zatím experimentálně ověřeno, zda by obstál při jízdě, potažmo rychlé jízdě nebo jízdě v náročném terénu. [26] [27]



a)

Obr. 24) a) Lorentzova síla [28]



b)

b) Lorentzova síla na robotu [26]



## 3 JÍZDA NA JEDNOM KOLE

Jednokolka může být charakterizována 3 úhly, kterými se může naklápět. Je to úhel kolem vertikální osy (vybočení), úhel kolem horizontální příčné osy (klonění) a úhel kolem horizontální podélné osy (klopení) (anglicky: Yaw, Pitch, Roll) (Obr.25). Pro zjištění přesné polohy vozidla v prostoru, je nutné znát i souřadnici bodu dotyku kola se zemí.

Člověk jedoucí na jednokolce (Obr. 26) je komplexní redundantní systém, který může být rozdělen na dva subsystémy: První, spodní část, se skládá z jezdcových nohou a jednokolky. Nohama jezdec pozici a rychlost kola. Toto řídí rychlost soustavy a naklonění kolem horizontální příčné osy.

Druhá část, vrchní, se skládá z jezdcova trupu a paží. Pohybem paží a nakláněním a otáčením trupu může jezdec ovlivnit všechny výše zmíněné úhly najednou.

### 3.1 Stabilizování jednokolky

Znamená udržet ji ve vertikální pozici. K tomu je zapotřebí ovládat úhly naklopení kolem příčné a podélné horizontální osy. Ke stabilizaci jednokolky pomocí tohoto „lidského“ systému můžou být následovány tři hlavní přístupy: První spočívá ve zablokování kola a balancování jednokolky pouze pohybem trupu a paží. Zablokováním kola ztratíme jeden stupeň volnosti, z jednokolky se tak vlastně stává obrácené kyvadlo.

Druhou možností je rozdělit příčnou a podélnou stabilitu. Podélná stabilita může být ovládána pohybem kola a příčná pohybem těla (nakloněním trupu doleva a doprava).

Třetí přístup využívá kolo ke stabilizaci úhlu naklonění okolo příčné horizontální osy a rotační pohyby těla otáčí kolem ve směru, v němž jednokolka padá. U tohoto přístupu je boční nestabilita transformována do úhlu otáčení okolo osy kola, který je následně eliminován správným šlapáním na pedály.

Lidské řízení jednokolky je přitom kombinací všech těchto přístupů.



Obr. 25) Vybočení, klonění, klopení (anglicky: Yaw, Pitch, Roll) [29]

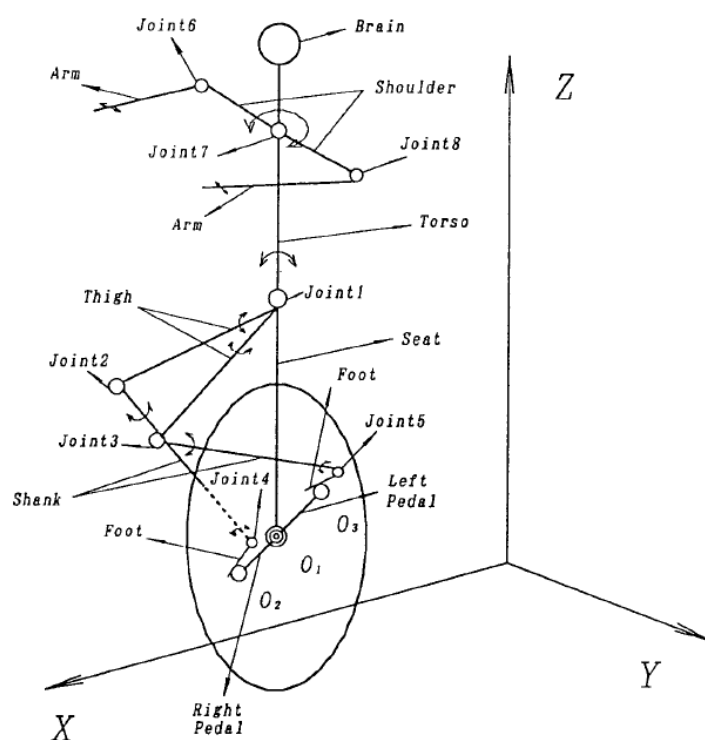
### 3.2 Metody zatáčení

Zatáčení je problematika týkající se rotace kolem vertikální osy jednokolky, rotace kolem horizontálních os je zapotřebí především při stabilizování. Můžeme pozorovat dvě různé metody zatáčení jednokolkou. První využívá stejné rotační pohyby jako byly ve třetím přístupu stabilizace, akorát tentokrát pouze pro zatáčení a ne pro stabilizaci. Tyto pohyby otočí jednokolkou prakticky na místě. Druhá metoda se skládá z naklonění se na jednu stranu při šlapání na pedály. Je velmi složité udržet při této metodě správnou silovou rovnováhu, vyžaduje správnou kontrolu těžiště a můžeme ji sledovat u těch zkušenějších jezdců.

### 3.3 Stabilita

Systém je považován za stabilní, když může být přiveden do nějakého stabilního stavu. Jednokolka nemůže být do žádného takového stavu přivedena. Na základě pozorování lidí, jezdících na jednokolce formuloval Sheng [8] definici posturální stability.

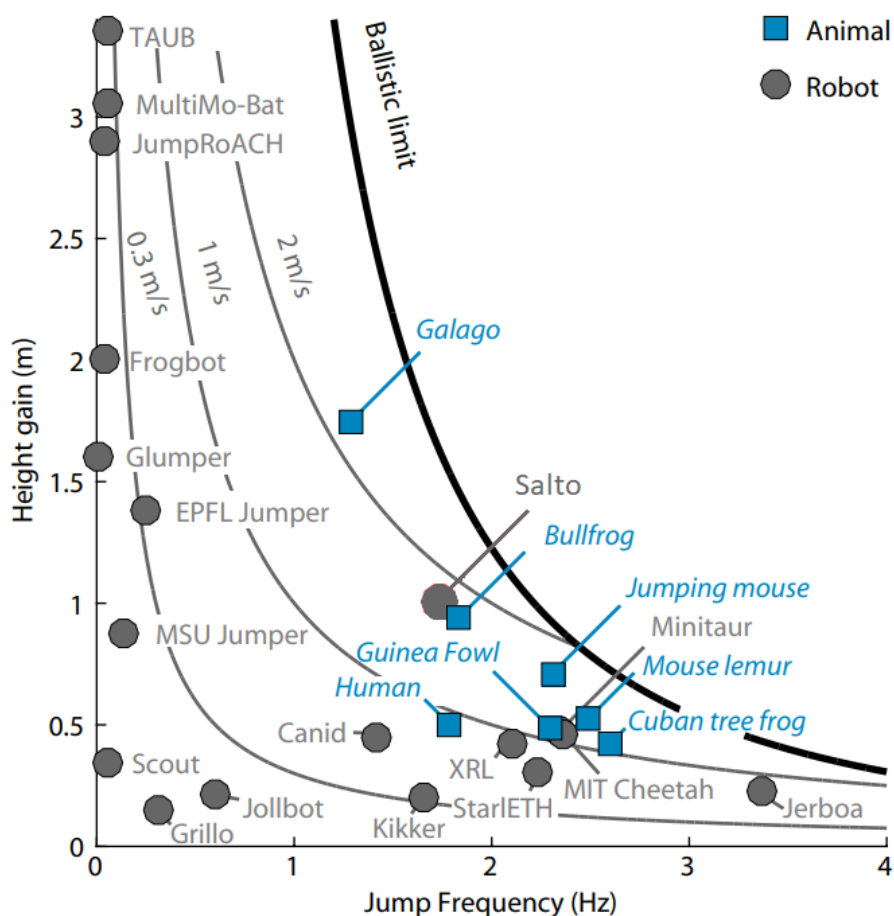
První poznatek je, že posturální stabilita bude narušena když naklonění kolem jedné z horizontální os je větší než  $16^\circ$ . (To samozřejmě úzce souvisí s maximální hodnotou momentu, který mohou pohony vyvinout.) Druhý je, že stabilita je obvykle ztracena, když vyrovnávací síla nereaguje 1 sekundu a déle. [29]



Obr. 26) Kinematika člověka na jednokolce [8]

## 4 SKÁKACÍ MECHANISMUS MOBILNÍCH ROBOTŮ

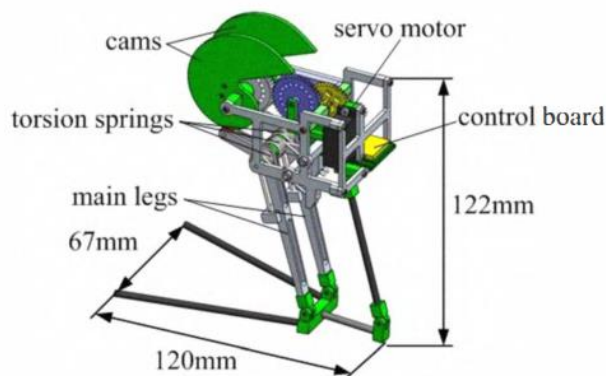
Protože předmětem této práce je také vyřešit skákací mechanismus. Je třeba se v rešerši zabývat i skákáním. Tato rešerše si neklade za cíl vyjmenovat a popsat všechna řešení skákacích mechanismů. Pro jednoduchost byly vybrány pouze koncepty využitelné do jednokolového robotu. Pro úplnost však uvádím graf skákacích robotů (Obr. 27), kde jsou zaznamenány jednotlivé dosud vynalezené koncepty robotů, ale také zvířat, v závislosti výška doskoku – frekvence skákání.



Obr. 27) Graf schopnosti skoku jednotlivých mobilních robotů a zvířat [30]

#### 4.1 Skákací mechanismus inspirovaný kobyolkou

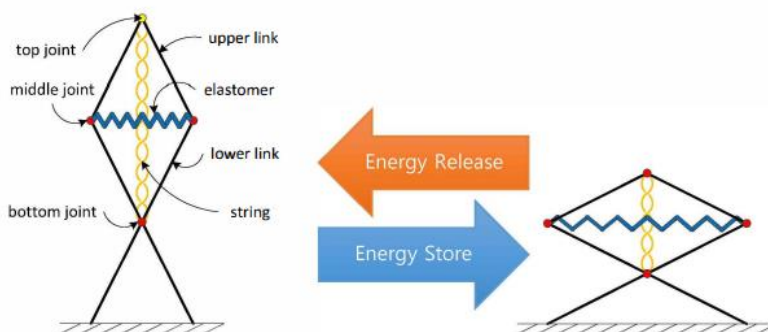
Tento mechanismus (Obr. 28) využívá torzní pružiny k přechovávání energie. Torzní pružiny jsou nainstalovány mezi hlavní nohy a rám robotu. Na hlavní noze je umístěné ložisko, které je propojené tangenciální vazbou s vačkou. Pro pohyb vačky, a tedy získání dostatečného točivého momentu ke kompresi pružiny, je využit servomotor s převodovkou. Tvar vačky je speciálně navrhnut pro rychlé uvolnění energie z pružiny a tím i ke skoku. [31]



Obr. 28) Skákací mechanismus inspirovaný kobyolkou [31]

#### 4.2 Skákací mechanismus inspirovaný žábou

Tento mechanismus (Obr. 29) je založen na mechanismu čtyřčlenu, který substituuje zadní končetiny žáby. Žába, jako každý dobře skákající živočich, má zužující se nohy. To proto, že čím lehčí je konečná část končetiny, tím menší má při skoku moment setrvačnosti. Takto je minimalizována energetická ztráta při skoku. Zadní končetina žáby má tři rotační vazby – kyčel, koleno a kotník. Každá z nich mění svůj úhel natočení při skoku. Úhel kyčelní vazby se vůči ose žáby zmenšuje, zatímco úhly ostatních vazeb se zvětšují. V návaznosti na toto tvrzení byl navržen čtyřčlenný mechanismus, který kopíruje pohyb zadních končetin žáby. [32]



Obr. 29) Skákací mechanismus inspirovaný žábou [32]

## 5 ZHODNOCENÍ REŠERŠE

Na základě rešerše je možné hrubě rozdělit jednokolové roboty dle Tab. 1.

Tab 1) Rozdělení jednokolových robotů

Člověkem inspirované (přemisťování těžiště)	Robotická emulace jízdy člověka na jednokolce
	Jednokolový robot s horizontálním i vertikálním reakčním diskem
	Jednokolový robot stabilizovaný pákou uvnitř kola
	Jednokolový robot stabilizovaný pákou vně kola
	Jednokolový robot stabilizovaný posuvnou tyčí
Gyroskopem řízené	Gyrobo
	Gyrover
	Jednokolový robot se dvěma horizontálními gyroskopy
	Jednokolový robot se dvěma vertikálními gyroskopy
Se změněnou konstrukcí kola	Honda U3-X
	Rugby-wheel
Využívající jinou sílu	Air Blowing Control
	Jednokolový robot stabilizovaný Lorentzovou silou

Člověkem inspirované balanční mechanismy mají svoje výhody. Zvláště systémy založené na přesunování těžiště by mohly vcelku efektivně vyvážit náklad (vzorek) o různé hmotnosti. Robot by takto nemusel být energeticky náročný ani nákladný na výrobu. Nevýhodou by mohl být omezený úhel naklopení, který je možné vyvážit, nemožnost vstát z boku při ztrátě stability a následném pádu a nemožnost otočení kolem vertikální osy při nulové rychlosti. Využití reakčních disků se naopak nejeví jako výhodná varianta, zvláště kvůli pomalé reakci a možné nestabilitě systému při průjezdu složitějším terénem.

Gyroskopem řízená metoda balancování by naopak dokázala splnit většinu požadavků. Kvůli hmotnosti by bylo lepší použít pouze jeden gyroskop, což nebude s fuzzy logikou a výkonem dnešních mikroprocesorů problém. Je však pravda, že gyroskop má vyšší spotřebu energie, když je robot v klidu, což by mohlo vyústit v nepříznivě krátkou operační dobu robotu. Kapacita a hmotnost baterií je však dnes handicapem jakékoliv mobilní techniky. Uvážíme-li navíc, že robot musí mít schopnost skákání, mělo by smysl, aby uměl i měnit směr při letu, čehož by bylo možné za pomoci gyroskopu dosáhnout.

Dalším z hlavních předmětů zájmu bude zcela jistě samotný sběr vzorků, pro nějž je zapotřebí nějaký manipulátor. Jeho parametry jsou dány maximální hmotností vzorku 2Kg. Mělo by tedy být především rozhodnuto, zdali bude manipulátor koupen a nebo jej bude potřeba vyvíjet. Výhodou vývoje by bylo, že by byl dostatečně lehký a rozměrově padnoucí do celkové koncepce, ale je na pováženou, zdali se tím má tato práce zabývat.

Posledním konstrukčním uzlem bude skákací mechanismus, u něhož je třeba rozhodnout zdali má robot jen mírně skočit nebo se někam katapultovat. Vzhledem k tomu, že u jednokolového vozidla je při použití dostatečného průměru kola průjezdnost terénem všeobecně výborná, mělo by smysl, aby se robot dokázal katapultovat na větší vzdálenosti.

Při předběžných dynamických výpočtech v simulačním nástroji MSC Adams bylo zjištěno, že skákací mechanismus inspirovaný žábou nevyhovuje požadavkům, a proto není uvažován v návrhových variantách.

## 6 SYSTÉMOVÝ ROZBOR

### 6.1 Problémová situace

Současná řešení jednokolových robotů se omezují pouze na pohyb v jednoduchém prostředí bez překážek. V případě, že se objeví například zeď, kterou není možné objet, vysoký obrubník, či strom spadlý přes cestu, narážejí všechna současná řešení na své limity.

Dále se žádná z těchto současných koncepcí nezaměřuje na praktické využití, tudíž nedisponují například manipulátorem pro sběr vzorků. Roboty, které umí sbírat vzorky a skákat, zase nemají pouze jedno kolo, a tak jsou dynamicky méně stabilní (viz. Úvod).

### 6.2 Formulace problému

Problém je dát jednokolovému robotu schopnost skákání a sběru vzorků.

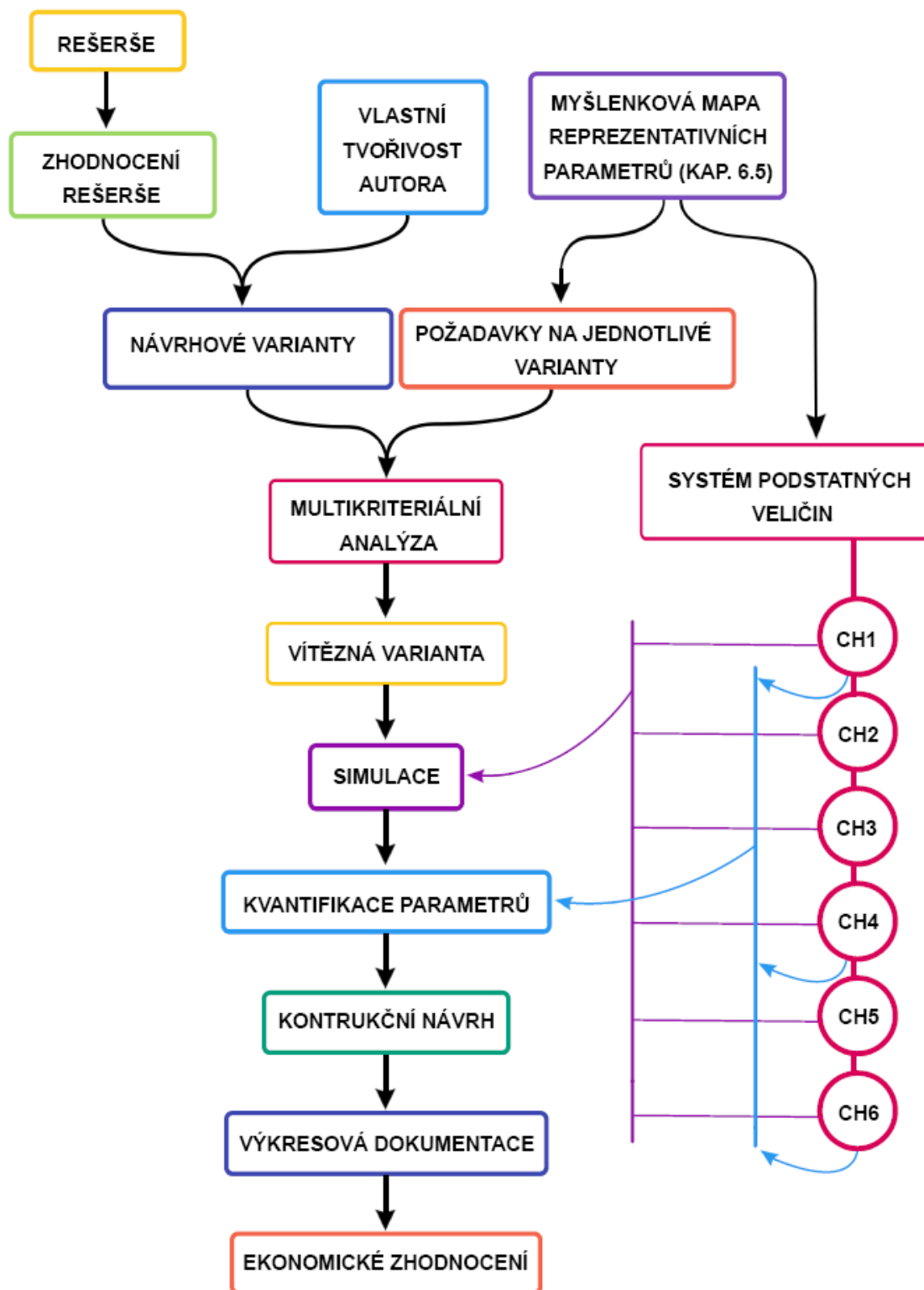
### 6.3 Formulace cílů a řešení

- Cíle diplomové práce jsou následující:
- Vytvoření návrhových variant
- Multikriteriální zhodnocení variant
- Potřebné technické výpočty vybrané varianty
- Zpracování výkresové dokumentace vybrané varianty
- Ekonomické zhodnocení

Ze zadání diplomové práce je zřejmé, že je potřeba navrhnout jednokolového robota, který je schopen skákat a sbírat vzorky, které váží maximálně 2 Kg. Měl by být také schopen průjezdu složitějším terénem.

Základní charakteristikou jednokolového robota je balanční mechanismus. Nejprve bude tedy třeba navrhnout vhodný mechanismus, který by korespondoval se zadáním. Dále bude navržen skákačí a uchopovací mechanismus.

## 6.4 Diagram postupu práce

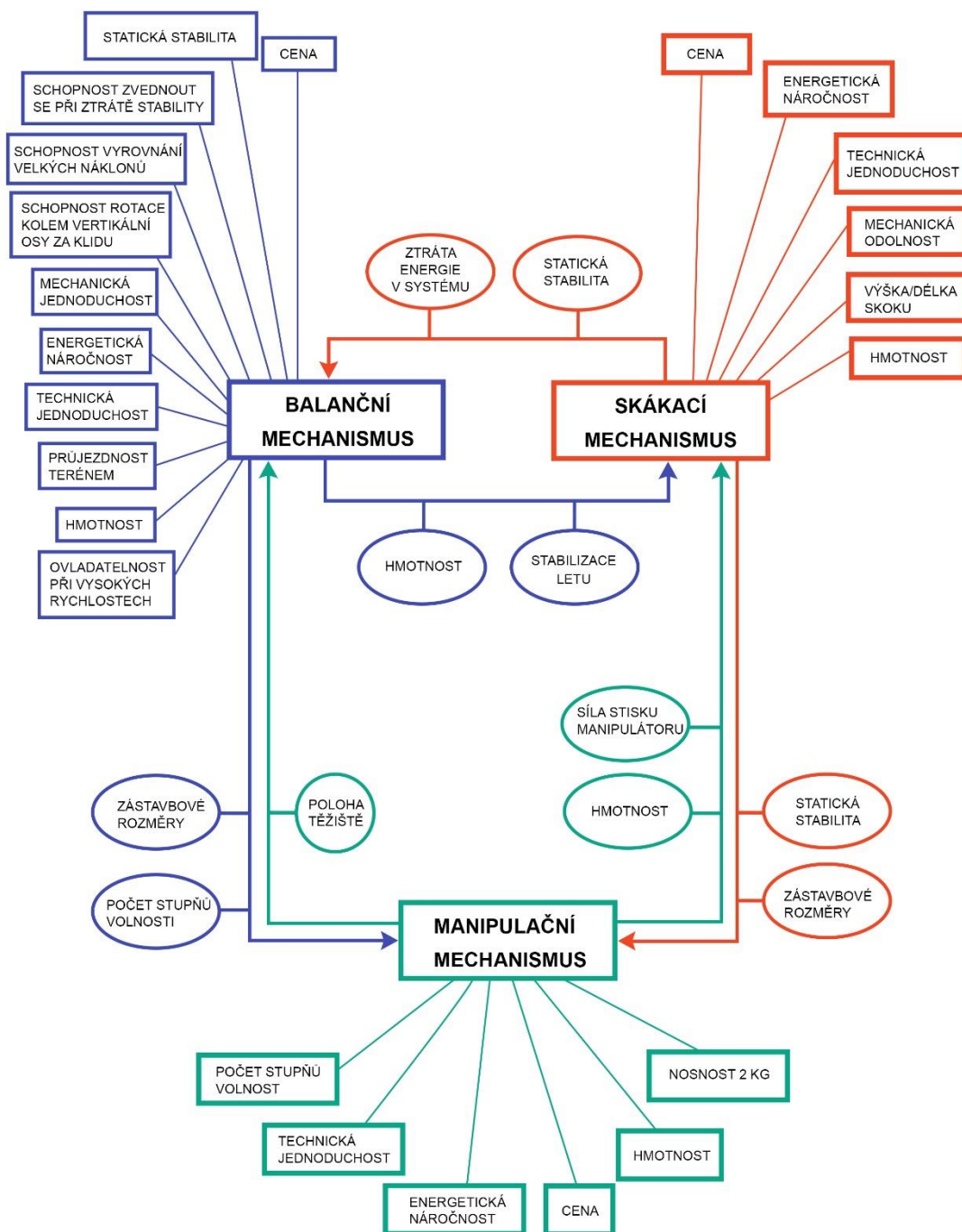


Obr. 30) Diagram postupu práce



## 6.5 Reprezentativní parametry

Pro výběr reprezentativních parametrů byla vypracována myšlenková mapa, v jejímž centru je zasazen trojúhelník vztahů balančního mechanismu – skákacího mechanismu – manipulačního mechanismu. V elipsovitém ohraničení jsou ovlivňující parametry a v obdélníkovém ohraničení jsou parametry vstupující do jednotlivých mechanismů.



Obr. 31) Diagram reprezentativních parametrů

## 6.6 Popis řešené soustavy

Řešená soustava je konstrukce robota. Robot je složen z jednoho kola, balančního mechanismu, skákacího mechanismu, uchopovacího manipulátoru, baterií, pohonů a řídicí elektroniky.

## 6.7 Systém podstatných veličin

Podstatné veličiny vychází mimo jiné i z reprezentativních parametrů, které jsou zaříděny do charakteristických skupin CH1 až CH6, jež následně fungují jako vstupy do simulace.

Tab 2) Systém podstatných veličin

SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN		
<i>Charakteristika</i>	<i>Veličiny, parametry</i>	<i>Doplňující údaje</i>
<b>CH 1 –</b> <i>Struktura, geometrie, topologie</i>	Velikost robota (průměr kola)	
	Hmotnost robota	
	Momenty setrvačnosti v jednotlivých osách	
	Poloha těžiště v jednotlivých osách	
<b>CH 2 –</b> <i>Vazby a interakce robota s okolím</i>	1 obecná neholonomní vazba při provozu po vodorovné hladké podložce svislý směr působíště normálové síly	Síla v kontaktu kola s podloží
	1 obecná neholonomní vazba při provozu v terénu – vychýlený směr působíště normálové síly	
	Tíhová síla	
	Klopný moment	
<b>CH 3 –</b> <i>Ovlivňování robota okolím</i>	Boční klopná síla	Při foukání větru
	Struktura a členitost povrchu	
<b>CH 4 –</b> <i>Vlastnosti prvků struktury (tj. částí robota)</i>	Hmotnost	Viz tabulka s částmi robota, tyto parametry jednotlivě pro každou část robota
	Momenty setrvačnosti	
	Maximální rozměry	
	Rozmístění v robota	
	Polohy těžišť	
	Kapacita akumulátoru	Z toho vyplývají rozměry a hmotnost
	Výkony pohonů	Pro konstrukční návrh nepříliš podstatné
	Potenciální energie pro skok	Prostě kolik energie je nutné uložit do pružiny, aby robot skočil

	Rychlost otáčení setrvačníku	
<b>CH 5 –</b> <i>Procesy a stavy robotu</i>	Jízda	
	Skok	
	Sběr vzorků	
<b>CH 6 –</b> <i>Projevy robotu</i>	Max. rychlost	
	Max. zrychlení	
	Max. úhel vychýlení při zachování stability	
	Poloměr zatačení	
	Operační čas	
	Doskok nebo výška skoku	
	Kinematika skoku	
	Frekvence skoků	

Tab 3) Základní části robotu

<b>ZÁKLADNÍ ČÁSTI ROBOTU</b>	
1	Balanční mechanismus
2	Skákací mechanismus
3	Manipulační mechanismus
4	Opěrný mechanismus
5	Rám a lokomoční ústrojí (kolo a jeho náhon)
6	Pohony
7	Zdroj energie
8	Řídicí systém, senzorika a kabeláž

## 7 NÁVRHOVÉ VARIANTY

V této kapitole budou představeny čtyři návrhové varianty. Řešení se inspiřují koncepcemi z rešeršní studie, doplňují je ale o funkce skákání a sběru vzorků. Při doplnění funkcí je nutné brát v úvahu stabilitu celého zařízení. Návrhové varianty jsou založeny na kombinaci dvou koncepcí balančních mechanismů a třech skákačích mechanismů, přičemž bude zohledněna přítomnost mechanismu pro sběr vzorků. Samotný mechanismus pro sběr vzorků nebude vyvíjen, ale bude navržena implementace již existujícího, zakoupeného. Je to z důvodu časového omezení realizace práce a předpokladu nízkého přínosu oproti vyvíjenému mechanismu. Bude ale zjištěno, kolik stupňů volnosti musí mít samotný mechanismus ramena pro sběr vzorků.

Vzhledem k tomu, že v zadání je explicitně zmíněn průjezd terénem, bylo snahou navrhovat varianty, které jsou pro tuto aplikaci vhodné. To je důvod, proč je u všech variant celý mechanismus umístěn uvnitř kola.

První varianta, z první skupiny zohledňující balanční mechanismus, B1 je inspirovaná člověkem a funguje na principu přesouvání těžiště. Druhá varianta B2 je řízená jedním gyroskopem.

První varianta, z druhé skupiny zohledňující skákačích mechanismus, Varianta S1 je vybavena skákačím mechanismem inspirovaným kobyilkou. Varianta S2 využívá skákačích mechanismus postavený na principu celoodpruženého kola. A poslední varianta S3 je postavena na principu odpružené platformy pohybující se translačně na rozpěrné tyči v kole.

### 7.1 Varianta B1

#### Popis

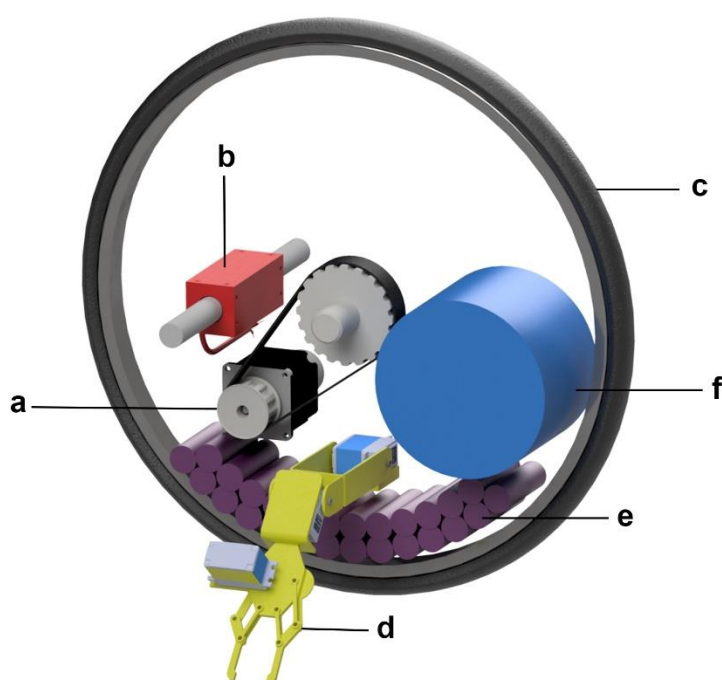
Varianta B1 je zobrazena na Obr. 32. Jedná se o jednokolového robota jehož balanční mechanismus je postaven na principu změny polohy těžiště. Je schopen sběru vzorků a dokáže skákat. Balanční mechanismus sestává z tyče se závažím, která je poháněna lineárním elektromotorem, rychlost přestavení je velmi vysoká a robot tak dokáže balancovat i v náročných podmínkách. Vysoké zrychlení lineárního pohonu lze za určitých podmínek navíc využít i pro vymrštění robota od země při jeho pádu na bok.

Pohon celého robota obstarává stejnosměrný rotační servomotor s inkrementálním rotačním enkodérem na hřídeli, který přes převod realizovaný ozubeným řemenem roztáčí celé kolo přímo v ose otáčení. Akumulátory jsou uloženy co nejnižší pro dosažení optimální polohy těžiště. Dále je součástí i RRR manipulátor se třemi stupni volnosti, který dokáže sebrat vzorek a držet jej po celou dobu přepravy tak, aby těžiště celého robota bylo stále v rámci vertikální podélné roviny robota.

### Výhody a nevýhody varianty B1

Zjevnou výhodou varianty B1 je nízká spotřeba energie a tedy dlouhá výdrž baterie, dále má tato koncepce nižší hmotnost a je jednodušší na naprogramování řídicího systému. Jednoduchá koncepce balančního mechanismu navíc slibuje nízkou poruchovost a nízkou výrobní cenu.

Nevýhodou je malý úhel naklopení který je možné vyvážit a nemožnost otočení kolem vertikální osy při nulové rychlosti, což klade vyšší nároky na manipulátor. Také mechanická odolnost by mohla být nižší kvůli přesouvané tyči, která narušuje celkovou kompaktnost topologie systému.



Obr. 32) Varianta B1 a) pohon b) balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) prostor pro skákací mechanismus

## 7.2 Varianta B2

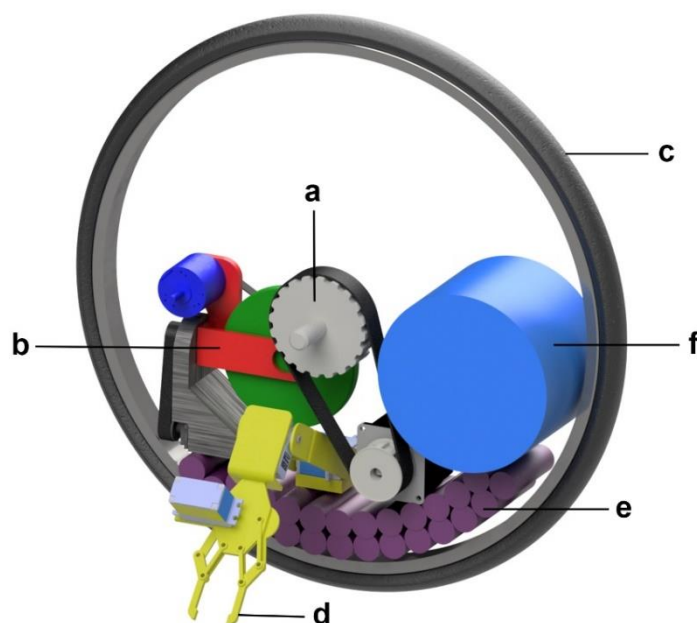
### Popis

Varianta B2 využívá jako balančního mechanismu gyroskop. Jak je vidět na Obr. 33 gyroskop sestává z vysokootáčkovým elektromotorem hnaného disku, který má osu otáčení ve výchozí poloze rovnoběžnou s osou kola. Naklápěcí mechanismus poháněný servomotorem dokáže natáčet diskem kolem osy, která je rovnoběžná s podélnou horizontální osou. Toto natočení vyústí v natočení celého robotu kolem vertikální osy. Energetická náročnost této koncepce je vyšší než u varianty B1, ale dala by se teoreticky snížit tím, že by se do systému zakomponovaly vysouvací opěrné nohy, které by dokázaly zajistit statickou stabilitu během klidu a sběru vzorků.

Pohon a akumulátory robotu jsou provedeny stejně jako u varianty B1. Avšak rozdíl je v manipulátoru, který má nyní pouze dva stupně volnosti RR. To proto, že celý robot je schopný se otáčet kolem své vertikální osy. Balanční mechanismus tedy dokáže nahradit jeden stupeň volnosti manipulátoru a tudíž snížit jeho hmotnost.

### Výhody a nevýhody varianty B2

Výhodou varianty B2 je balanční mechanismus založený na principu gyroskopického jevu, který je zdaleka nejdokonalejší pro dosažení rovnováhy. Dokáže vyvážit i velké úhly naklopení robotu, potažmo jej zvednout ze země při pádu na bok. Vzhledem k tomu, robot balancovaný gyroskopem se dokáže při nulové rychlosti otočit kolem své vertikální osy, je možné použít manipulátor s nižším počtem stupňů volnosti. V neposlední řadě bude gyroskopický balanční mechanismus mechanicky odolnější, neboť celé zařízení půjde uzavřít do krytu.



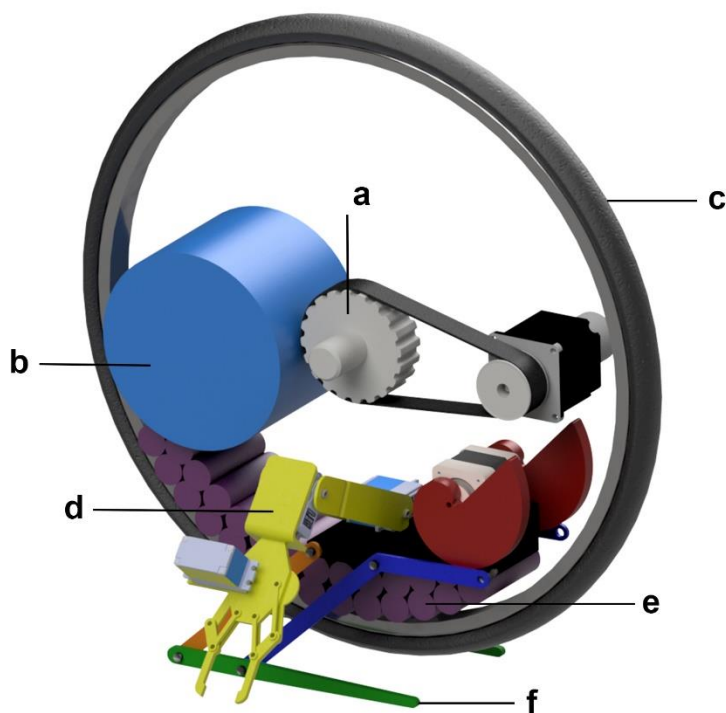
Obr. 33) Varianta B2 a) pohon b) balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) prostor pro skákací mechanismus

Nevýhodou je všeobecně vysoká spotřeba energie, která by však mohla být snížena vhodnou konstrukcí vysouvacích opěrných nohou, což však souvisí s celkovou technickou složitostí a nákladností varianty B2. Další nevýhodou je problematické programování řídicí jednotky a další nepříznivé jevy, které s sebou gyroskop nese jako třeba skládání momentů a nebo vibrace, které působí rušivě na senzory.

### 7.3 Varianta S1

#### Popis

Skákací mechanismus je umístěn v dolní části robota, jak lze vidět na Obr. 34. Skládá se ze dvou odpružených nohou, které jsou postaveny na principu paralelogramu a vačkového mechanismu poháněného krokovým motorem. Vačkový mechanismus vede kuličkové ložisko, které je připevněné na odpružené noze, tím dochází ke kompresi torzních pružin, v nichž se akumuluje energie, která je následně vačkovým mechanismem náhle uvolněna a dojde ke skoku.



Obr. 34) Varianta S1 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) skákací mechanismus

### Výhody a nevýhody varianty S1

Výhodou této koncepce skákacího mechanismu je, že jeho části mohou sloužit také jako opěrné nohy pro dosažení statické stability bez nutnosti využití balančního mechanismu. Varianta také není nikterak nákladná na výrobu. Co se týče manipulátoru, předpokládá se provedení se dvěma až třemi stupni volnosti (v závislosti na balančním mechanismu).

Nevýhodou je vyšší energetická náročnost, vyšší hmotnost a poněkud horší skladnost celého mechanismu v pohotovostním režimu. Nohy celkově narušují kompaktní topologii systému, což může být problém při průjezdu terénem.

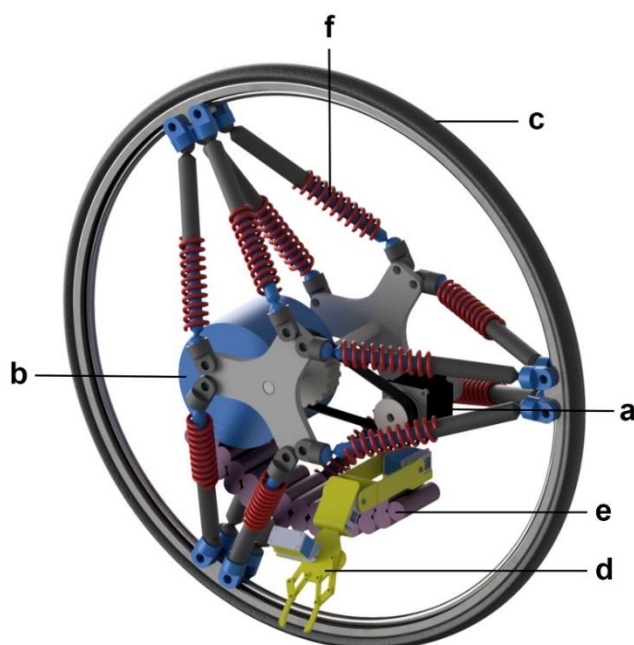
## **7.4 Varianta S2**

### Popis

U této varianty skákacího mechanismu (Obr. 35) tvoří veškeré zařízení včetně baterií a pohonů kompaktní celek, který je zavěšen na soustavě pružin do ráfku kola. Skoku se docílí tím, že se celá hmota uvnitř kola posune směrem dolů od osy otáčení a tak se naakumuluje energie do pružin. Následné uvolnění vede ke skoku. Tato varianta byla inspirována odpruženými invalidními vozíky.

### Výhody a nevýhody varianty S2

Tato koncepce je energeticky méně náročná, poněvadž se ke skoku využije hybnost, do které vstupuje hmotnost všech zařízení uvnitř robotu. Lze zde mluvit o lepší průjezdnosti terénem, poněvadž zařízení je kompaktní, a také nižší hmotnosti.



Obr. 35) Varianta S2 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) odpružení (skákací mechanismus)

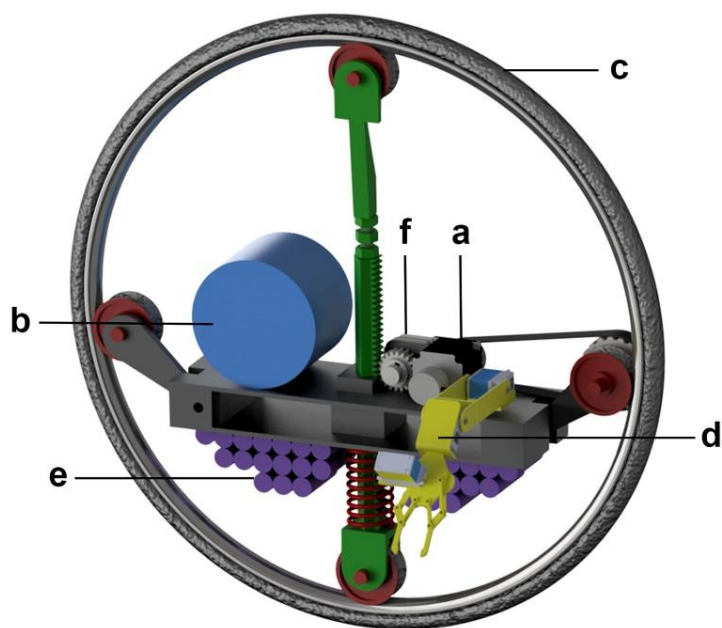


Nevýhodou je, že může docházet k určitým ztrátám energie od hnacího pohonu, respektive od balančního mechanismu, v pružinách. Nevýhoda také spočívá v nepříznivé topologii systému pro manipulátor, který by musel být redundantní aby se mohl proplétat mezi pružinami, což by zvýšilo jeho hmotnost (předpokládá se tři až čtyři stupně volnosti) V neposlední řadě je nevýhodou i fakt, že systém neposkytuje žádné opěrné body pro dosažení statické stability při sběru vzorků.

## 7.5 Varianta S3

### Popis

Tato návrhová varianta je v principu podobná variantě S2. Veškeré zařízení včetně pohonů je umístěno na platformě, která se může translačně pohybovat nahoru a dolů na rozpěrné tyči, zakončené kladkami, jež se odvalují po vedení na ráfku kola (Obr. 36). Na rozpěrné tyči je vyfrézován ozubený hřeben, do něhož zapadá pastorek, kterému udává točivý moment pohon připevněný na platformě. Takto se může celá platforma posouvat dolů vůči ose otáčení kola, čímž zároveň stlačuje pružinu, do níž hromadí se energie je následně rázem uvolněna a dochází ke skoku. Pohon kola je zajištěn pomocí jedné z opěrných kladek, umístěných na platformě, která je torzní pružinou přitahována k vedení na ráfku a přes třecí kontakt přenáší točivý moment na samotné kolo robotu.



Obr. 36) Varianta S3 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) skákový mechanismus

### Výhody a nevýhody varianty S2

Tato varianta je energeticky obdobně náročná jako S2, poněvadž se ke skoku využije hybnost, do které vstupuje hmotnost všech zařízení uvnitř robotu, avšak nedochází zde ke ztrátám energie v pružinách a jsou zde lepší topologické podmínky pro manipulátor, čímž může dojít ke snížení jeho hmotnosti (je zde předpokládán manipulátor se dvěma až třemi stupni volnosti).

Nevýhodou je opět absence opěrných bodů pro dosažení statické stability při sběru vzorků a také možné snížení účinnosti přenosu kroutícího momentu přes třecí kontakt mezi kladkou a vedením na ráfku.

## 8 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA VARIANT

Pro výběr optimální varianty byla použita multikriteriální analýza. Nejprve bylo nutné vybrat reprezentativní parametry a přiřadit k nim váhu podle důležitosti. Při hodnocení varianty budou každému parametru udělené body, které se vynásobí s váhou parametru, načež se sečtou. Optimální varianta je ta, která bude mít největší hodnotu součtu. Přičemž varianty balančního mechanismu a varianty skákacího mechanismu se hodnotí zvlášť. Hodnocení probíhá tak, že nejvyšší hodnota 1 odpovídá nejpodstatnějšímu parametru (v případě váhy) a nejvhodnějšímu řešení (v případě bodů). Hodnota 0 je naopak nejnižší.

### 8.1 Výběr reprezentativních parametrů

Na základě myšlenkové mapy v kapitole 6.6 byl vypracován seznam reprezentativních parametrů a každému byla přidělena váha.

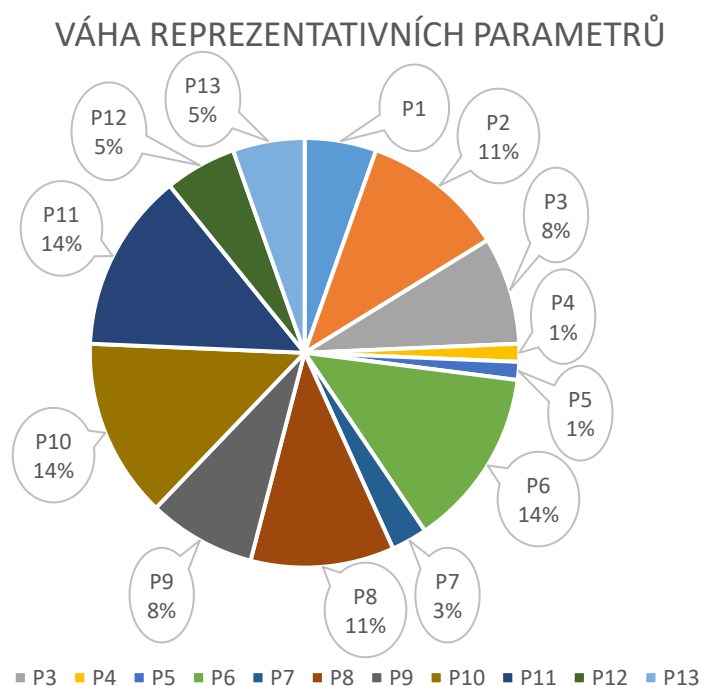
- P1: Energetická náročnost
- P2: Schopnost vyrovnání velikých náklonů
- P3: Schopnost zvednutí se ze země při pádu
- P4: Schopnost otáčení kolem vertikální osy při nulové rychlosti
- P5: Schopnost stabilizace letu při skoku
- P6: Průjezdnost terénem
- P7: Ovladatelnost při vysokých rychlostech
- P8: Hmotnost
- P9: Mechanická odolnost
- P10: Výška skoku
- P11: Statická stabilita
- P12: Náklady na výrobu
- P13: Technická jednoduchost

### 8.2 Přiřazení váhy reprezentativním parametrům

Tab 4) Váha reprezentativních parametrů

Parametr	Váha parametru	Odůvodnění	Popis odůvodnění
P1	V1=0,4	3x v myšlenkové mapě	Je pravděpodobné, že v budoucnu bude vynaloženo velké úsilí k vývoji lehčích a méně objemných elektrických akumulátorů, respektive zdrojů energie. Tento parametr tedy má pouze dočasnou hodnotu.
P2	V2=0,8	Souvisí se zadáním	Parametr velmi ovlivňuje funkčnost robotu v terénu.
P3	V3=0,6	Souvisí se zadáním	Parametr také ovlivňuje funkčnost robotu v terénu.

P4	V4=0,1	Parametr navíc	Tento parametr záleží na konkrétní aplikaci robotu.
P5	V5=0,1	Parametr navíc	Tento parametr mírně ovlivňuje funkčnost robotu.
P6	V6=1	Je v zadání	Parametr zásadně ovlivňuje funkčnost robotu vzhledem k zadání.
P7	V7=0,2	Parametr navíc	Tento parametr mírně ovlivňuje funkčnost robotu.
P8	V8=0,8	5x v myšlenkové mapě	Tento parametr ovlivňuje funkčnost robotu, neboť souvisí s délkou, respektive výškou skoku.
P9	V9=0,6	2x v myšlenkové mapě	Tento parametr ovlivňuje funkčnost robotu v terénu.
P10	V10=1	Je v zadání	Parametr zásadně ovlivňuje funkčnost robotu vzhledem k zadání.
P11	V11=1	3x v myšlenkové mapě	Vlastnost nutná pro sběr vzorků.
P12	V12=0,4	3x v myšlenkové mapě	Tento parametr ovlivňuje ekonomické hledisko.
P13	V13=0,4	3x v myšlenkové mapě	Tento parametr ovlivňuje následnou snadnost údržby, otevřenost vůči úpravám, případně recyklaci.



Obr. 37) Graf váhy reprezentativních parametrů

### 8.3 Varianta B1

Tab 5) Varinta B1

Parametr	Body parametru	Odůvodnění
P1	BA1=1	Energetická náročnost není tak velká jako u gyroskopu.
P2	BA2=0,4	Lineárním pohonem není možné vyrovnat takový úhel jako gyroskopem.
P3	BA3=0,4	Je možné, že robot se bude schopný za určitých podmínek vymrštit ze země.
P4	BA4=0	Není možné.
P5	BA5=0	Není možné.
P6	BA6=0,4	Robot nebude natolik stabilní v terénu, jako při použití gyroskopu.
P7	BA7=0,4	Robot nebude natolik stabilní při vysokých rychlostech, jako při použití gyroskopu.
P8	BA8=0,8	Robot bude lehčí než při použití gyroskopu.
P9	BA9=0,4	Mechanická odolnost je nižší, kvůli přesouvané tyči, která narušuje kompaktnost robotu.
P10	BA10=0,8	Vzhledem k nižší hmotnosti je tato varianta příznivější pro skákání.
P11	BA11=0,4	I při použití opěrných noh bude stabilita jistější s gyroskopem.
P12	BA12=0,8	Lineární pohon bude levnější než výroba gyroskopu.
P13	BA13=0,8	Lineární pohon je technicky jednodušší než gyroskop.

$$\varepsilon_{B1} = \frac{V1 \cdot BA1 + V2 \cdot BA2 + V3 \cdot BA3 + V4 \cdot BA4 + V5 \cdot BA5 + V6 \cdot BA6 + V7 \cdot BA7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} + \frac{V8 \cdot BA8 + V9 \cdot BA9 + V10 \cdot BA10 + V11 \cdot BA11 + V12 \cdot BA12 + V13 \cdot BA13}{V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{B1} = \frac{0,4 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,4 + 0,6 \cdot 0,4 + 0,1 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 1 \cdot 0,4}{0,4 + 0,8 + 0,6 + 0,1 + 0,1 + 1} + \frac{0,2 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,8}{0,2 + 0,8 + 0,6 + 1 + 1 + 0,4 + 0,4} = 0,56$$

## 8.4 Varianta B2

Tab 6) Varianta B2

Parametr	Body parametru	Odůvodnění
P1	BB1=0,4	Energetická náročnost je vyšší, lze ji však snížit na únosnou mez instalací opěrných nohou.
P2	BB2=1	Gyroskopická stabilizace je efektivnější.
P3	BB3=0,8	Je možné, že robot se bude schopný za většiny podmínek zvednout ze země.
P4	BB4=1	Je možné
P5	BB5=1	Je možné
P6	BB6=1	Robot bude stabilní při průjezdu terénem.
P7	BB7=1	Robot bude stabilní při vysokých rychlostech.
P8	BB8=0,2	Balanční mechanismus bude těžší.
P9	BB9=0,8	Mechanická odolnost je vyšší. Celý systém bude možné uzavřít v krytu.
P10	BB10=0,2	Vzhledem k vyšší hmotnosti není tato varianta tolik příznivá pro skákání.
P11	BB11=0,6	I při použití opěrných noh bude stabilita jistější s gyroskopem.
P12	BB12=0,2	Výroba gyroskopu bude dražší.
P13	BB13=0,2	Gyroskop je technicky složitější zařízení.

$$\varepsilon_{B2} = \frac{V1 \cdot BB1 + V2 \cdot BB2 + V3 \cdot BB3 + V4 \cdot BB4 + V5 \cdot BB5 + V6 \cdot BB6 + V7 \cdot BB7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} + \frac{V8 \cdot BB8 + V9 \cdot BB9 + V10 \cdot BB10 + V11 \cdot BB11 + V12 \cdot BB12 + V13 \cdot BB13}{V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{B2} = \frac{0,4 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 1 + 0,6 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 1 + 1 \cdot 1}{0,4 + 0,8 + 0,6 + 0,1 + 0,1 + 1} + \frac{0,2 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,6 + 0,2 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,4}{0,2 + 0,8 + 0,6 + 1 + 1 + 0,4 + 0,4} = 0,60$$

## 8.5 Varianta S1

Tab 7) Varianta S1

Parametr	Body parametru	Odůvodnění
P1	SA1=0,6	Je mírně energeticky náročnější.
P2	SA2=0	Nebude mít vliv.
P3	SA3=0	Nebude mít vliv.
P4	SA4=0	Nebude mít vliv.
P5	SA5=0	Nebude mít vliv.
P6	SA6=0,4	Průjezdnost terénem bude horší, neboť mechanismus celkově porušuje kompaktnost systému.
P7	SA7=0	Nebude mít vliv.
P8	SA8=0,5	Mechanismus bude mírně těžší, ale uspoří hmotnost opěrných nohou.
P9	SA9=0,2	Bude horší, kvůli narušení kompaktnosti systému.
P10	SA10=0,6	Bude mírně menší.
P11	SA11=0,8	Není potřeba přidavných nohou.
P12	SA12=0,8	Bude levnější.
P13	SA13=0,6	Zařízení je technicky mírně složitější, avšak zjednodušuje oporu pro statickou stabilitu

$$\varepsilon_{S1} = \frac{V1 \cdot SA1 + V2 \cdot SA2 + V3 \cdot SA3 + V4 \cdot SA4 + V5 \cdot SA5 + V6 \cdot SA6 + V7 \cdot SA7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} + \frac{V8 \cdot SA8 + V9 \cdot SA9 + V10 \cdot SA10 + V11 \cdot SA11 + V12 \cdot SA12 + V13 \cdot SA13}{V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{S1} = \frac{0,4 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0 + 0,6 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 1 \cdot 0,4}{0,4 + 0,8 + 0,6 + 0,1 + 0,1 + 1} + \frac{0,2 \cdot 0 + 0,8 \cdot 0,5 + 0,6 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6}{0,2 + 0,8 + 0,6 + 1 + 1 + 0,4 + 0,4} = 0,42$$

## 8.6 Varianta S2

Tab 8) Varianta S2

Parametr	Body parametru	Odůvodnění
P1	SB1=0,8	Je energeticky méně náročný.
P2	SB2=0	Nebude mít vliv.
P3	SB3=0	Nebude mít vliv.
P4	SB4=0	Nebude mít vliv.
P5	SB5=0	Nebude mít vliv.
P6	SB6=0,6	Průjezdnost terénem bude lepší, neboť mechanismus neporušuje kompaktnost systému.
P7	SB7=0	Nebude mít vliv.
P8	SB8=0,6	Mechanismus bude mírně lehčí.
P9	SB9=0,6	Bude lepší, kvůli tomu, že kompaktnost systému nebude narušena.
P10	SB10=0,8	Bude dostačující.
P11	SB11=0,2	Je potřeba přídavných nohou.
P12	SB12=0,2	Bude dražší.
P13	SB13=0,2	Zařízení je technicky složité.

$$\varepsilon_{S2} = \frac{V1 \cdot SB1 + V2 \cdot SB2 + V3 \cdot SB3 + V4 \cdot SB4 + V5 \cdot SB5 + V6 \cdot SB6 + V7 \cdot SB7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} + \frac{V8 \cdot SB8 + V9 \cdot SB9 + V10 \cdot SB10 + V11 \cdot SB11 + V12 \cdot SB12 + V13 \cdot SB13}{V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{S2} = \frac{0,4 \cdot 0,8 + 0,8 \cdot 0 + 0,6 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 1 \cdot 0,6}{0,4 + 0,8 + 0,6 + 0,1 + 0,1 + 1} + \frac{0,2 \cdot 0 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,2}{0,2 + 0,8 + 0,6 + 1 + 1 + 0,4 + 0,4} = 0,41$$



## 8.7 Varianta S3

Tab 9) Varianta S3

Parametr	Body parametru	Odůvodnění
P1	SC1=0,8	Je energeticky méně náročný.
P2	SC2=0	Nebude mít vliv.
P3	SC3=0	Nebude mít vliv.
P4	SC4=0	Nebude mít vliv.
P5	SC5=0	Nebude mít vliv.
P6	SC6=0,6	Průjezdnost terénem bude lepší, neboť mechanismus neporušuje kompaktnost systému.
P7	SC7=0	Nebude mít vliv.
P8	SC8=0,7	Mechanismus bude nejlehčí, ale bude za potřeby opěrných nohou.
P9	SC9=0,6	Bude lepší, kvůli tomu, že kompaktnost systému nebude narušena.
P10	SC10=0,8	Bude dostačující.
P11	SC11=0,2	Je potřeba přídatných nohou.
P12	SC12=0,9	Bude nejlevnější
P13	SC13=0,4	Zařízení je technicky relativně jednoduché, ale je za potřeby opěrných nohou.

$$\varepsilon_{S3} = \frac{V1 \cdot SC1 + V2 \cdot SC2 + V3 \cdot SC3 + V4 \cdot SC4 + V5 \cdot SC5 + V6 \cdot SC6 + V7 \cdot SC7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} + \frac{V8 \cdot SC8 + V9 \cdot SC9 + V10 \cdot SC10 + V11 \cdot SC11 + V12 \cdot SC12 + V13 \cdot SC13}{V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{S2} = \frac{0,4 \cdot 0,8 + 0,8 \cdot 0 + 0,6 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 1 \cdot 0,6}{0,4 + 0,8 + 0,6 + 0,1 + 0,1 + 1} + \frac{0,2 \cdot 0 + 0,8 \cdot 0,7 + 0,6 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,9 + 0,4 \cdot 0,4}{0,2 + 0,8 + 0,6 + 1 + 1 + 0,4 + 0,4} = 0,45$$

## 8.8 Závěr multikriteriální analýzy

Z analýzy vyplývá, že nejlepší je varianta B2 v kombinaci s variantou S3.

Tab 10) Výsledky multikriteriální analýzy

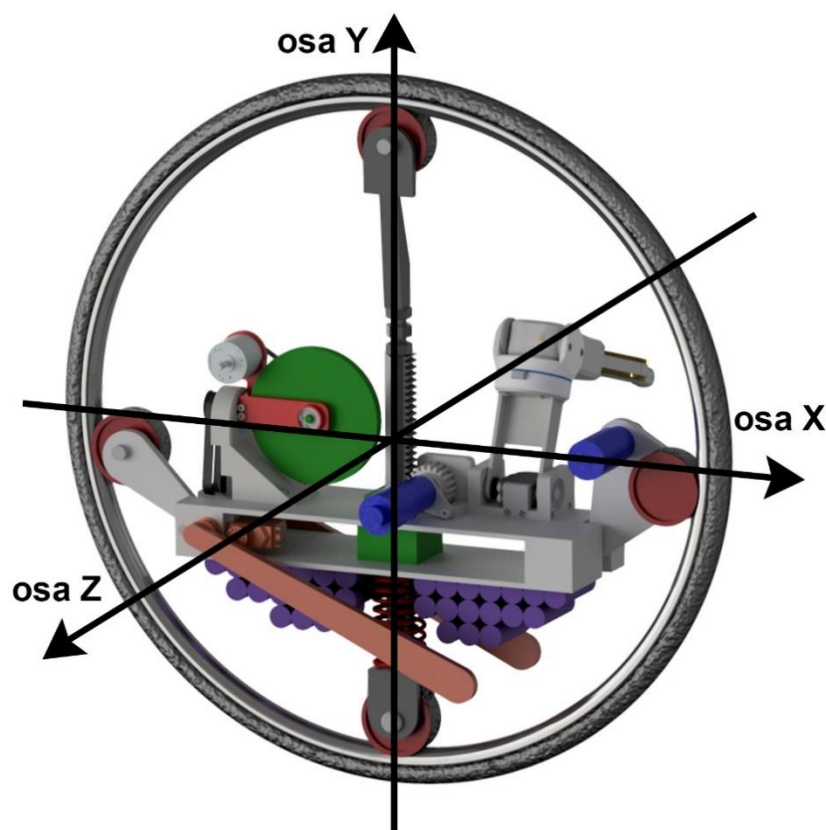
Varianta	B1	B2	S1	S2	S3
Celkové hodnocení	0,56	0,6	0,42	0,41	0,45



## 9 TECHNICKÉ VÝPOČTY

Výpočty dynamiky robotu byly provedeny prostřednictvím dynamických simulací v simulačním prostředí MSC ADAMS. Jako seznam vstupních parametrů byl využit upravený seznam z kapitoly 6.6 Systém podstatných veličin. Z důvodu nesmírného rozsahu řešení problému je většina parametrů vstupujících do simulace řešena metodou pokus – omyl.

Základním parametrem, který vyplývá ze zadání je maximální hmotnost vzorku 2 Kg. Za předpokladu, že se bude jednat například o kus horniny hustoty  $2700 \text{ Kg/m}^3$ , budou rozměry cca  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ . Pro manipulaci s takovým předmětem byl vybrán uchopovač RG2 Dánské firmy OnRobot. S přihlédnutím k rozměru a hmotnosti vzorku a uchopovače byly kvalifikovaným odhadem určeny rozměry a hmotnosti dalších komponent robotu potřebných pro simulaci. Zbýlé relevantní parametry potřebné pro simulaci, jako maximální rozměry, polohy těžišť a momenty setrvačnosti, byly odhadnuty z hrubého 3D modelu vypracovaného v prostředí Autodesk Inventor. Následující tabulka Tab. 11 používá kartézský souřadný systém definovaný na Obr.38.



Obr. 38) Deklarace os robotu

## 9.1 Seznam vstupních parametrů do simulace

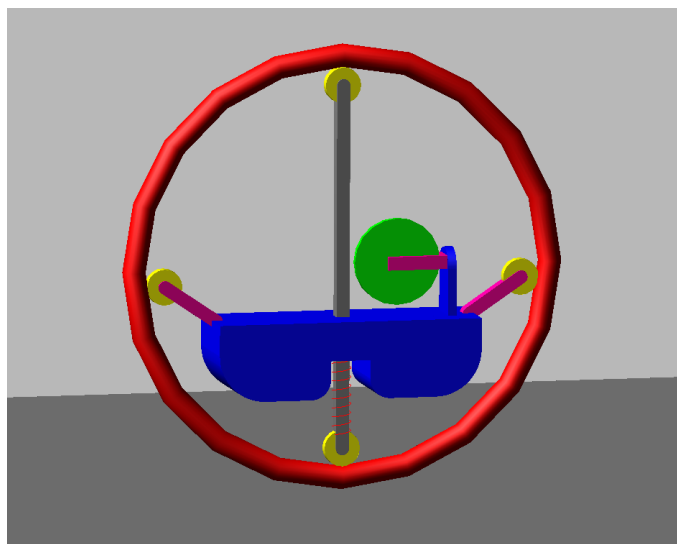
Tab 11) Seznam vstupních parametrů

Charakteristika	Veličiny, parametry		Hodnota
<b>CH 1</b> <i>Struktura, geometrie, topologie</i>	Velikost robotu (průměr kola)		670 mm
	Hmotnost robotu		15 Kg
	Momenty setrvačnosti v jednotlivých osách (x; y; z)		0,24; 0,21; 0,42 Kg.m <sup>2</sup>
	Poloha těžiště v jednotlivých osách (x; y; z)		0; -75; -5 mm
<b>CH 4</b> <i>Vlastnosti prvků struktury (tj. částí robotu)</i>	Setrvačnick	Hmotnost setrvačnicku	1 Kg
		Moment setrvačnosti setrvačnicku	0,002 Kg.m <sup>2</sup>
		Maximální rozměry (x; y; z)	Ø130 mm
		Poloha těžiště v rámci robotu (x; y; z)	-84; 5; 0 mm
		Rychlost otáčení setrvačnicku	6685 ot.min <sup>-1</sup>
	Naklápečí konzola setrvačnicku	Hmotnost	0,3 Kg
		Moment setrvačnosti	0,0002 Kg.m <sup>2</sup>
		Maximální rozměry	115; 25; 80 mm
		Poloha těžiště v rámci robotu (x; y; z)	-90; 5; 0 mm
	Šasi stroje (včetně opěrného, manipulačního, skákacího mechanismu, akumulátoru a pohonů)	Hmotnost	12 Kg
		Maximální rozměry (x; y; z)	550; 300; 130 mm
		Poloha těžiště (x; y; z)	0; -75; 0 mm
	Kladky (4x)	Hmotnost jedné kladky	0,35 Kg
		Moment setrvačnosti	0,0002 Kg.m <sup>2</sup>
		Poloha těžiště (x; y; z)	(272; -23; 0) (-272; -23; 0) (0; 272; 0) (0; -272; 0) mm
		Maximální rozměry	70x70x30 mm
	Kolo	Hmotnost	1,5 Kg

		Moment setrvačnosti	0,14 Kg.m <sup>2</sup>
		Poloha těžiště (x; y; z)	0; 0; 0 mm
		Maximální rozměry	670; 670; 30 mm
	Rozpěra	Hmotnost	1,8 Kg
		Maximální rozměry	30x30x580 mm
		Poloha těžiště (x; y; z)	0; -100; 0 mm
	Páky kladek (2x)	Hmotnost jedné páky	0,1 Kg
		Maximální rozměry	50x125x10 mm
		Poloha těžiště (x; y; z)	(250;-30;0) (-250;-30;0)
	Pohony ( <i>nejsou v simulaci definovány jako samostatná tělesa</i> )	Hmotnost hnacího pohonu	0,3 Kg
		Hmotnost pohonu naklápění setrvačníku	0,1 Kg
		Hmotnost pohonu setrvačníku	0,17 Kg
		Hmotnost pohonu skákacího mechanismu	0,3 Kg
		Hmotnost pohonu opěrných noh	0,1 Kg
	Zdroj energie ( <i>není v simulaci definován jako samostatné těleso</i> )	Hmotnost	2,4 Kg
		Kapacita akumulátoru	460 Wh (při napětí 12V)
<b>CH 6</b> <i>Projevy robotu</i>	Max. rychlost robotu		2 m.s <sup>-1</sup>
	Max. zrychlení robotu		0,85 m.s <sup>-2</sup>

## 9.2 Proces simulace

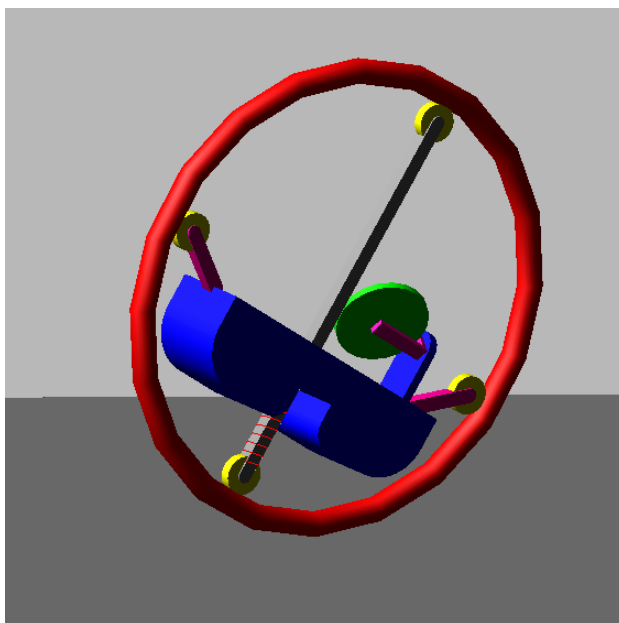
V prostředí MSC ADAMS byl nejprve vytvořen zjednodušený model robotu o jedenácti tělesech (Obr. 39), jimž byly přiřazeny příslušné parametry dle tabulky vstupních parametrů. Dále byly mezi tělesy nadefinovány vazby a pohyby. Na jedné z kladek byl definován rotační pohyb, způsobující zrychlení robotu dle tabulky vstupních parametrů. Setrvačníku byla přiřazena rychlost otáčení také podle tabulky vstupních parametrů.



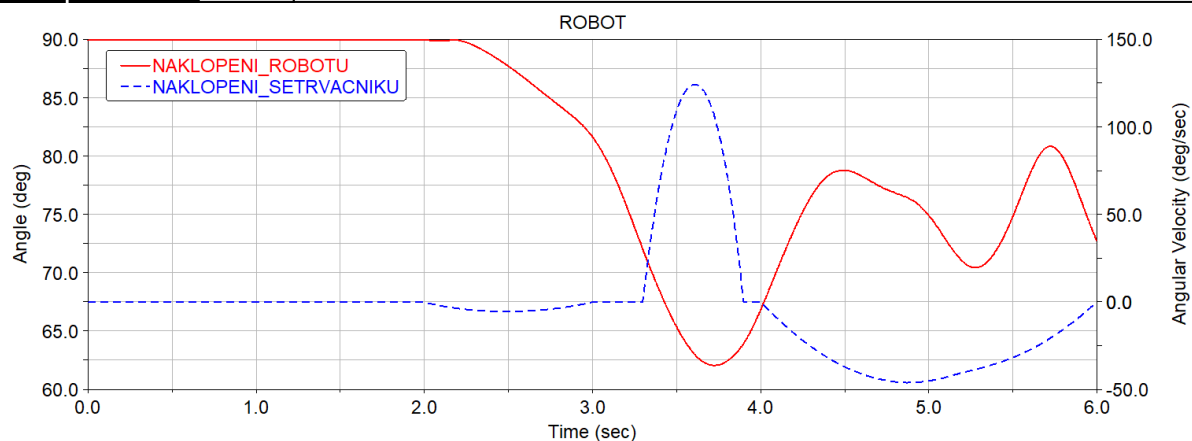
Obr. 39) Model robotu v prostředí MSC Adams

Robot byl testován celkem ve třech simulacích. První z nich simulovala vyhýbací manévry při zrychlování, druhá testovala maximální zrychlení a třetí simulovala schopnost skoku.

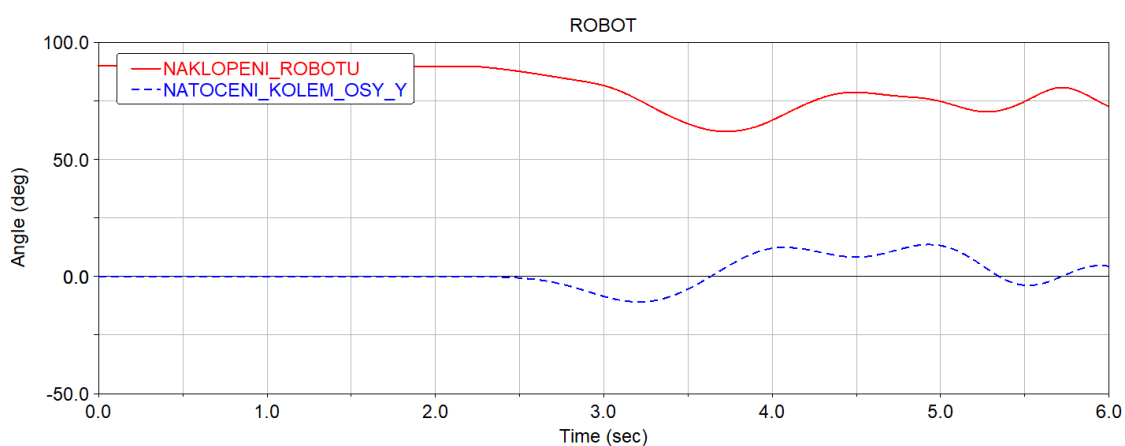
V simulaci číslo 1 byl pomocí funkce řízení rotační pohyb naklápěcí konzoly setrvačníku tak, aby robot při zrychlování učinil vyhýbací manévry (Obr. 40). Výsledkem simulace byly grafy na Obr. 41 a Obr. 42.



Obr. 40) Model robotu v MSC Adams zrychluje a natáčí setrvačník

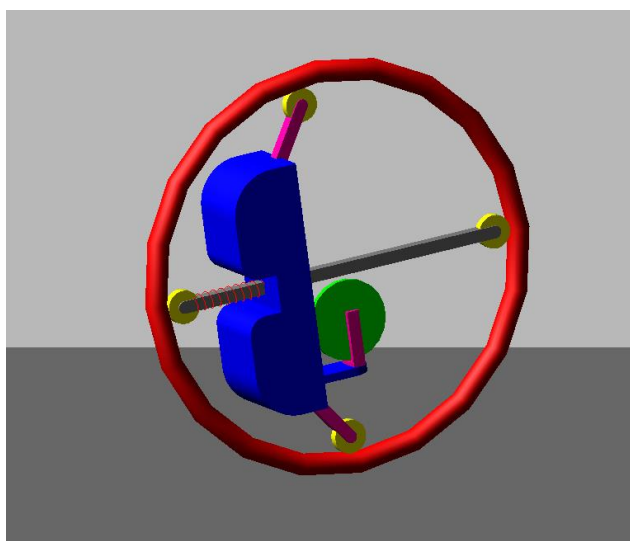


Obr. 41) Graf závislosti naklopení setrvačníku na naklopení robotu

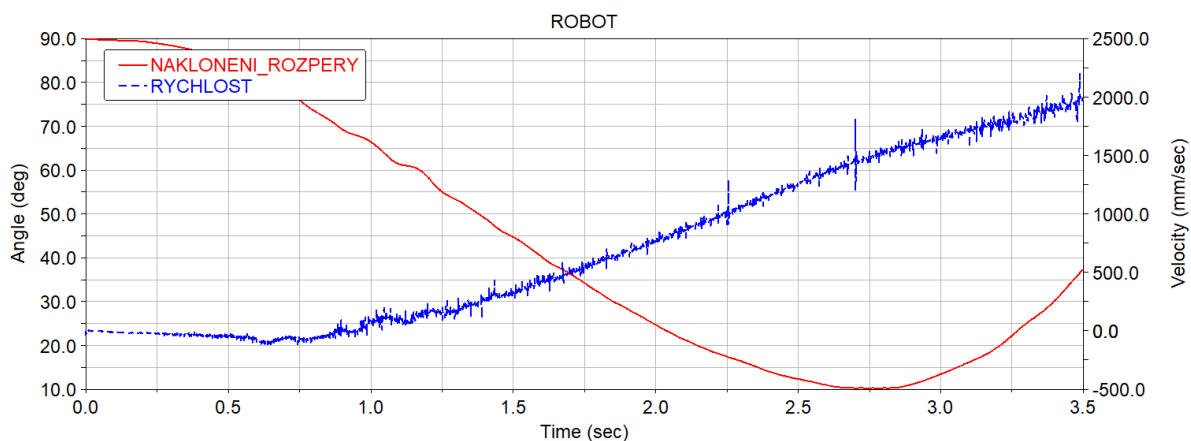


Obr. 42) Graf závislosti naklopení robotu a natočení kolem osy Y

V simulaci číslo 2 bylo testováno maximální zrychlení robotu. Robot zrychloval na rychlost  $2 \text{ m.s}^{-1}$  za 3,5 sekundy. Na Obr.43 lze vidět robot při maximálním zrychlení. Obr. 44 zase ukazuje graf závislosti rychlosti robotu na čase natočení vnitřního ústrojí v kole na čase.

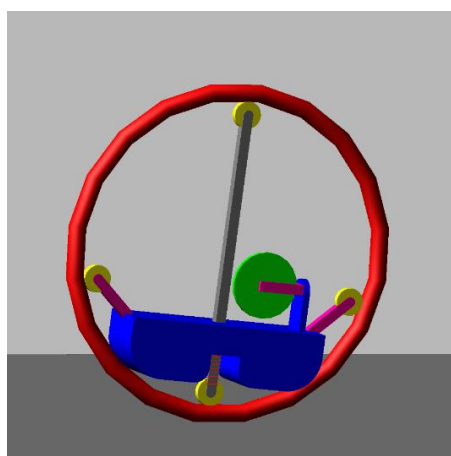


Obr. 43) Robot při maximálním zrychlení v prostředí MSC Adams

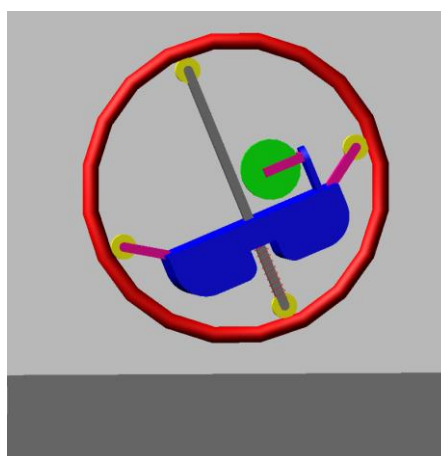


Obr. 44) Graf závislosti rychlosti robotu na naklonení rozpěrné tyče

V simulaci číslo 3 byla testována schopnost skoku. Robot nejprve zrychlil na rychlost  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , poté byla stlačena pružina o 30 mm silou s maximální hodnotou 2750 N. Uvolnění síly vedlo ke skoku vysokému 150 mm. Robot před skokem a při skoku lze vidět na Obr. 45 a) a b). Graf na Obr. 46 zase zobrazuje závislost stlačení pružiny na čase a vzdálenosti těžiště od země na čase.

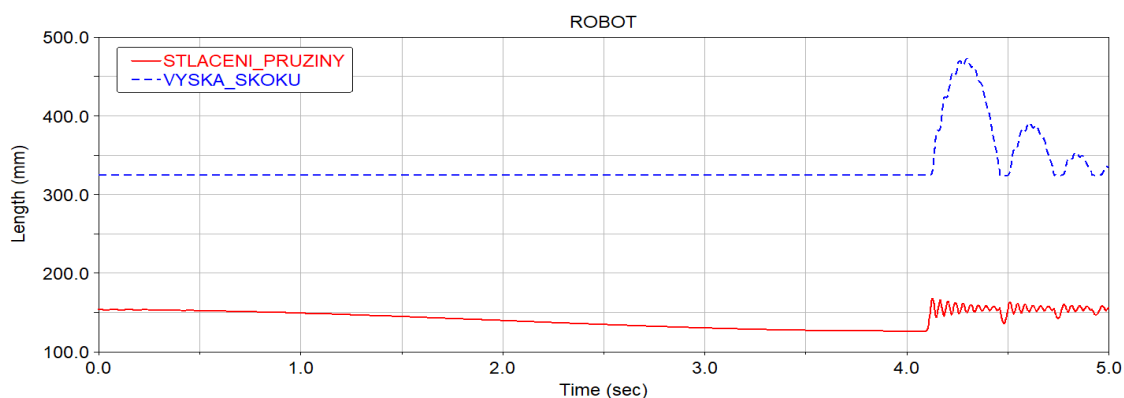


a)



b)

Obr. 45) a) Robot před skokem b) robot při skoku



Obr. 46) Graf závislosti stlačení pružiny na výšce skoku

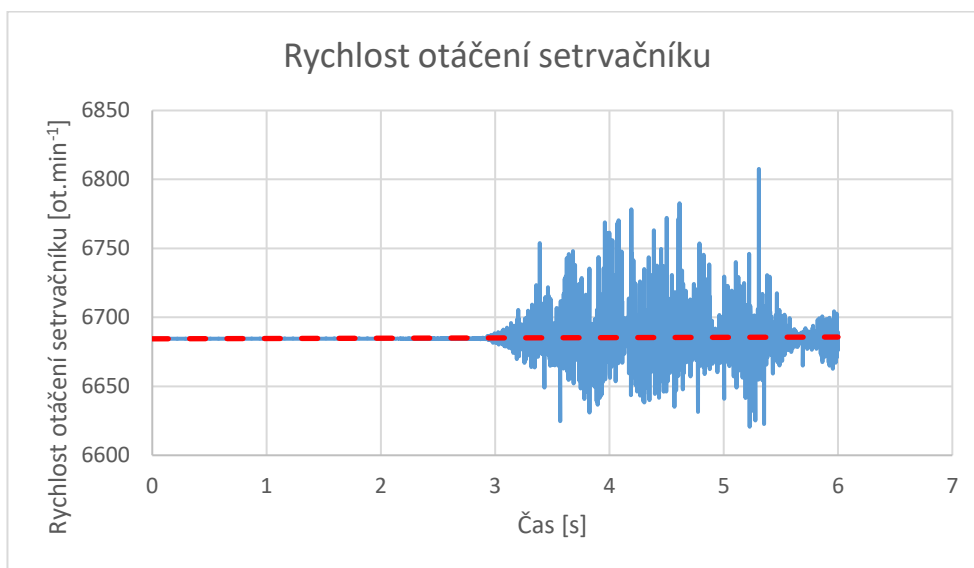


### 9.3 Výpočty pohonů

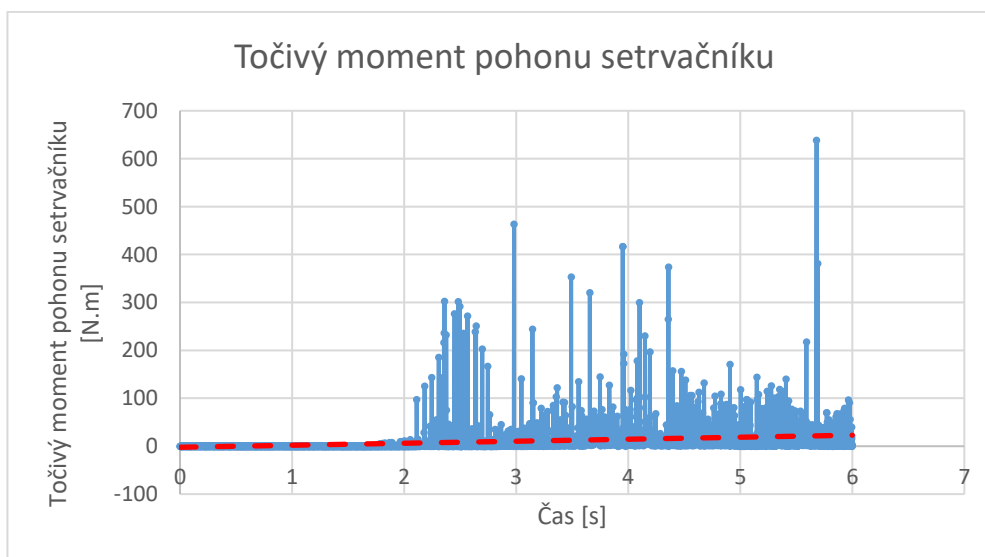
Pro správnou funkci robotu bylo zapotřebí vhodně dimenzovat pohony. Konkrétně se jedná o pohon setrvačníku, pohon naklápění setrvačníku, pohon hlavního kola a pohon skákacího mechanismu. Data vyexportována z prostředí MSC ADAMS byla dále aproximována v prostředí MS Excel a ověřena analytickými výpočty

#### Pohon setrvačníku

Pro výpočet pohonu setrvačníku byla exportována data ze simulace číslo 1. Data byla dále aproximována v programu MS Excel. Z grafu (Obr. 47) je vidět, že rychlost otáčení setrvačníku byla  $6685 \text{ ot.min}^{-1}$ . Hodnota točivého momentu pohonu setrvačníku je z grafu (Obr. 48) nejednoznačně stanovitelná. Medián všech hodnot má však maximální hodnotu  $1,2 \text{ Nm}$ .



Obr. 47) Graf závislosti rychlosti otáčení setrvačníku na čase (medián červeně)



Obr. 48) Graf závislosti točivého momentu pohonu setrvačníku na čase (medián červeně)

Výpočet základních parametrů setrvačníku:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot r_s^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 0,065^2 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6)$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s = 2 \cdot \pi \cdot 111,4 = 700,1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7)$$

Dle prvního Newtonova zákona by u pohonu setrvačníku jako je tento teoreticky neměl být definován žádný točivý moment, kromě točivého momentu, který je nutný na překonání odporu v ložiskách. Hodnota 1,2 Nm vzešlá ze simulace je neúměrně vysoká, takový pohon by byl velice těžký. Je nutné tedy vzít úvahu za druhý konec a vypočítat točivý moment analyticky z požadované doby rozběhu (tedy pomocí druhého Newtonova zákona). Aby byl pohon setrvačníku co nejjednodušší, byla zvolena doba rozběhu na 24 sekund.

Výpočet točivého momentu pohonu setrvačníku pomocí momentu hybnosti:

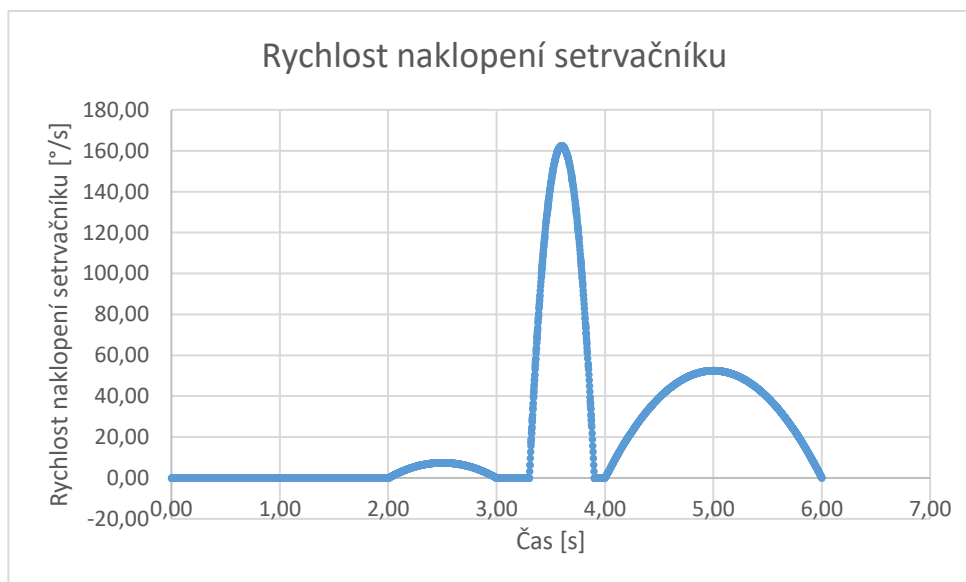
$$M_s = \frac{dL}{dt} = J_s \cdot \frac{d\omega_n}{dt_s} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{700,1}{24} = 0,06 \text{ Nm} \quad (8)$$

Výpočet maximální hodnoty gyroskopického momentu setrvačníku při uvažované úhlové rychlosti naklápění 15 rad.s<sup>-1</sup> (což je běžně dosažitelná maximální rychlost RC servopohonů) :

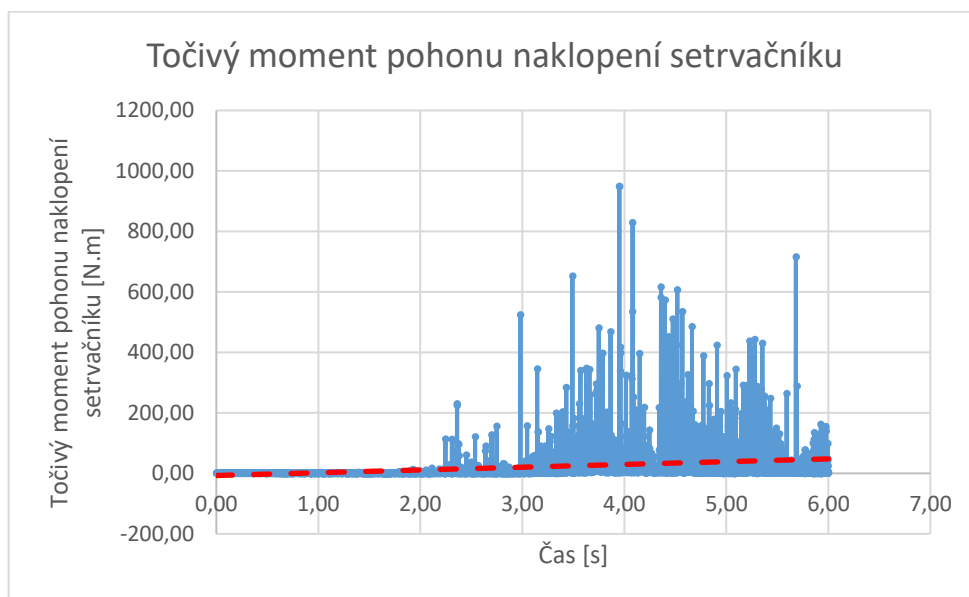
$$M_g = J_s \cdot \omega_s \cdot \omega_n = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 700,1 \cdot 15 = 22 \text{ Nm} \quad (9)$$

#### Pohon naklápění setrvačníku

Pro dimenzování pohonu naklopení setrvačníku byla taktéž použita data ze simulace číslo 1. Z grafu (Obr. 49) je vidět rychlost naklápění setrvačníku a v závislosti na tom i průběh točivého momentu pohonu naklápění (Obr. 50). Točivý moment opět není z grafu jednoznačně zjistitelný. Medián všech hodnot má maximální hodnotu 1,84 Nm.



Obr. 49) Graf závislosti naklápění setrvačníku na čase



Obr. 50) Graf závislosti točivého momentu pohonu naklopení setrvačníku na čase (medián červeně)

Volba pohonu naklápění byla dále ověřena pomocí rovnice (10), která vyjadřuje vztah mezi momentem setrvačnosti setrvačníku, rychlostí otáčení setrvačníku, rychlostí precese a točivým momentem naklápění.

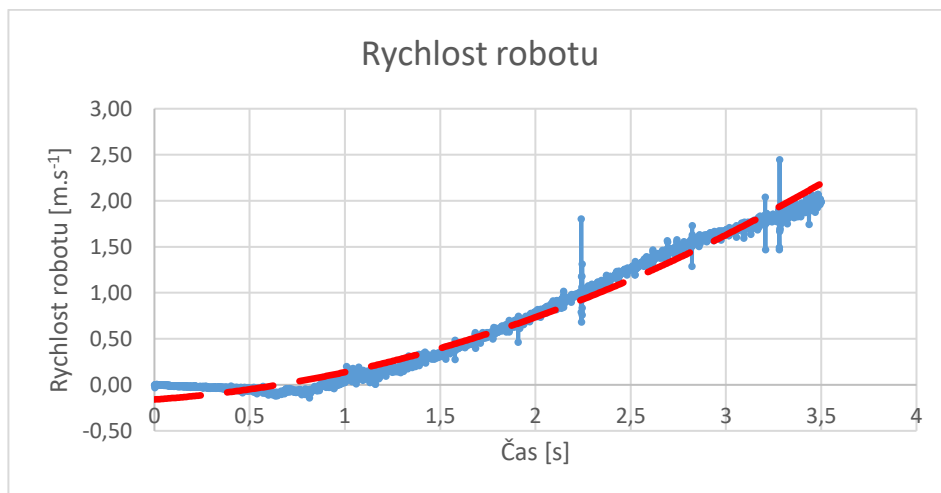
$$M_n = J_s \cdot \omega_s \cdot \omega_n \quad (10)$$

Přičemž moment setrvačnosti setrvačníku  $J_s$  známe z předchozích výpočtů, úhlovou rychlost jeho otáčení taktéž a úhlová rychlost precese  $\omega_n$  pro úspěšné balancování byla získána experimentálně v [19] a to mezi  $0,52 \text{ rad.s}^{-1}$  až  $1,74 \text{ rad.s}^{-1}$ .

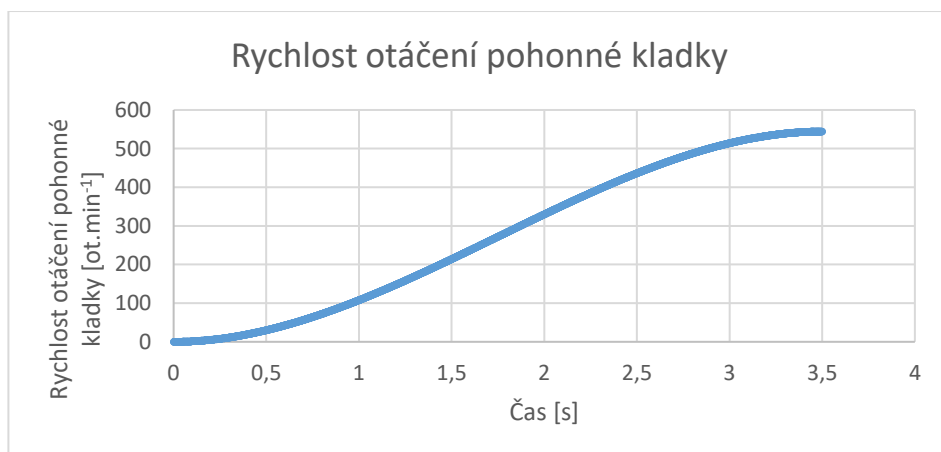
$$M_n = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 700,1 \cdot 1,74 = 2,6 \text{ Nm}$$

### Pohon hlavního kola

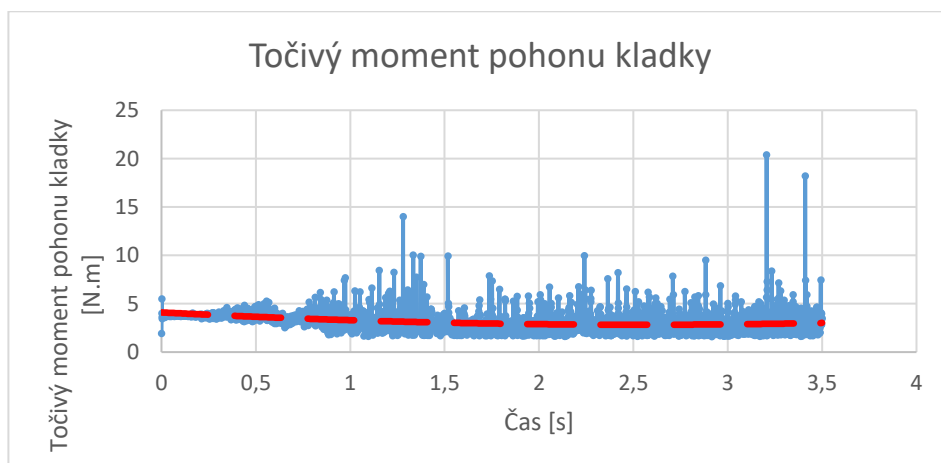
Pro dimenzování pohonu hlavního kola byla použita data ze simulace číslo 2. V prvních dvou grafech (Obr. 51 a 52) je vidět zrychlování robotu a zrychlování pohonné kladky. Ve třetím (Obr. 53) je znázorněn točivý moment na pohonné kladce.



Obr. 51) Graf závislosti rychlosti robotu na čase



Obr. 52) Graf závislosti rychlosti otáčení pohonné kladky na čase



Obr. 53) Graf závislosti točivého momentu pohonu kladky na čase (medián červeně)

Z posledního grafu je patrné, že hlavní pohon potřebuje nejvyšší hodnotu točivého momentu v prvních chvílích rozjezdu a to je 3,8 Nm.

Analytický výpočet vychází z principu vnitřního kyvadla robotu. Teoreticky nejefektivnější zrychlení má takový robot, když je jeho vnitřní kyvadlo nakloněno vůči výchozí poloze o 90°. V takové poloze je točivý moment kolem osy Z robotu způsobený pouze tíhovou silou vnitřního kyvadla. Rameno, na kterém tíhová síla působí je vzdálenost těžiště od osy Z robotu, což je 75 mm.

$$M_{gk} = F_{gk} \cdot R_t = m_k \cdot g \cdot R_t = 13,5 \cdot 9,81 \cdot 0,075 = 9,9 \text{ Nm} \quad (11)$$

Toto je moment, který musí pohon překonat, aby dosáhl optimální efektivity zrychlení. Je tedy nutné nejdříve vypočítat sílu, která odpovídá tomuto momentu v místě dotyku pohonné kladky a ráfku, které je vzdáleno od osy Z o hodnotu  $R_d=0,264$  m.

$$F_k = \frac{M_g}{R_d} = \frac{9,9}{0,264} = 37,5 \text{ N} \quad (12)$$

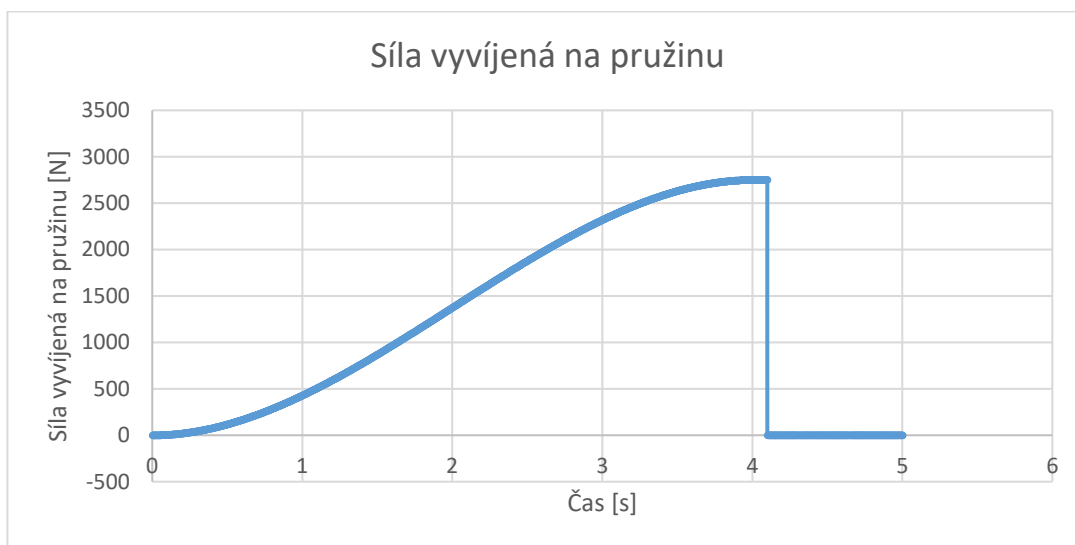
A tuto sílu můžeme převést na moment, který musí být vyvinut na pohonnou kladku o poloměru  $R_k = 0,027$  m.

$$M_k = F_k \cdot R_k = 37,5 \cdot 0,027 = 1 \text{ Nm} \quad (13)$$

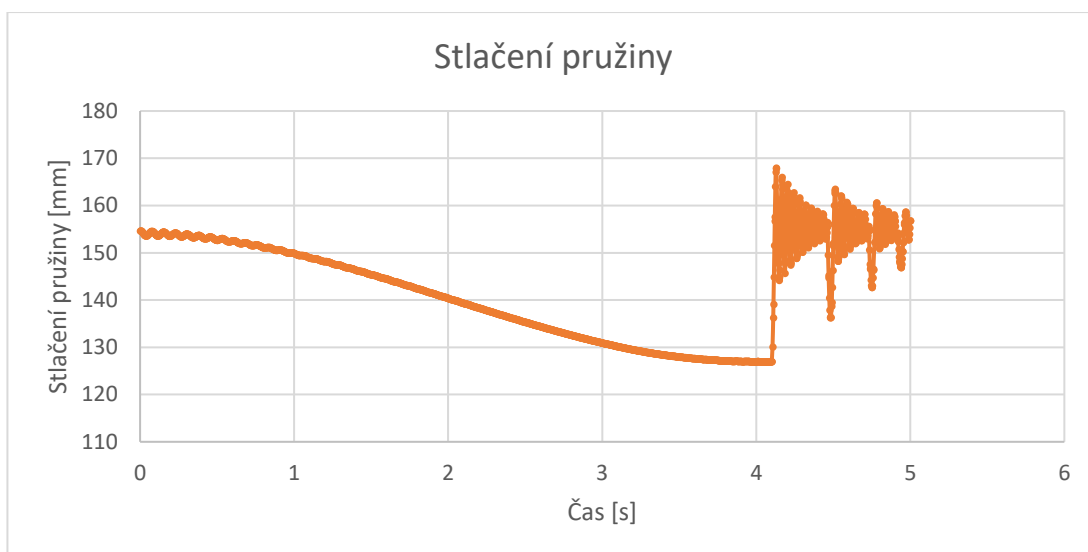
To znamená, že robot by měl teoreticky optimálně zrychlovat, když točivý moment na pohonné kladce bude vyšší než 1 Nm.

### Pohon skákacího mechanismu

Pro dimenzování pohonu skákacího mechanismu byla použita data ze simulace číslo 3. Ze dvou jednoduchých grafů (Obr. 54 a 55) je patrné, že maximální síla vyvíjená na pružinu je 2750 N.m a stlačení pružiny se rovná 30 mm.



Obr. 54) Graf závislosti síly vyvíjené na pružinu na čase



Obr. 55) Graf závislosti stlačení pružiny na čase

Dále bylo nutné vypočítat z potřebné síly točivý moment na pohonu skákacího mechanismu. Přičemž bylo zvoleno, že po ozubeném hřebenu se bude odvalovat ozubené kolo s poloměrem roztečné kružnice  $R=0,02$  m. Tedy platí:

$$M_p = F_p \cdot R_p = 2750 \cdot 0,02 = 55 \text{ Nm} \quad (14)$$

## 9.4 Výstupy ze simulace

Tab 12) Výstupní hodnoty ze simulace

Veličiny, parametry	Hodnota
Max. úhel vychýlení při zachování stability	90°
Poloměr zatačení	R0
Operační čas	30 min
Výška skoku	150 mm
Frekvence skoků	0,2 Hz
Výkon hnacího pohonu	220 W
Točivý moment hnacího pohonu	3,8 N.m
Rychlost otáčení hnacího pohonu	550 ot.min <sup>-1</sup>
Výkon pohonu naklápění setrvačníku	8 W
Točivý moment pohonu naklápění setrvačníku	2,6 N.m
Rychlost otáčení pohonu naklápění setrvačníku	16 ot.min <sup>-1</sup>
Výkon pohonu setrvačníku	40 W
Točivý moment pohonu setrvačníku	0,06 N.m
Výkon pohonu skákacího mechanismu	300 W
Rychlost otáčení pohonu skákacího mechanismu	4 ot.min <sup>-1</sup>
Točivý moment pohonu skákacího mechanismu	55 N.m
Tuhost torzní přitlačné pružiny	1000 N.mm/°
Tuhost pružiny skákacího mechanismu	100 N/mm

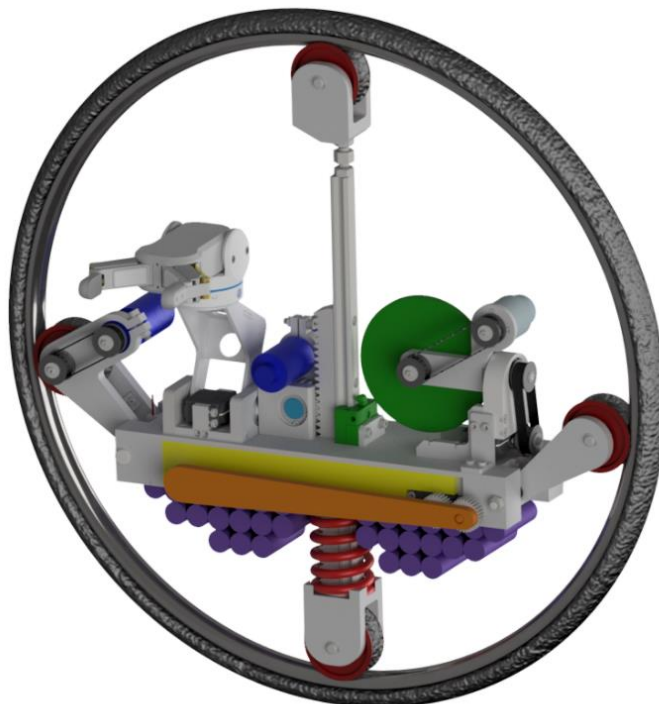
## 10 KONSTRUKCE ROBOTU

Konstrukce robotu (Obr. 56) je rozdělena do jednotlivých konstrukčních uzlů a to: konstrukce balančního mechanismu, konstrukce skákacího mechanismu, konstrukce opěrných nohou, konstrukce rámu a lokomočního ústrojí, konstrukce manipulačního mechanismu a poslední kapitola pojednávající o elektronice.

Na mobilního robota, pohybujícího se v terénu jsou všeobecně kladeny vysoké požadavky. Ten nejdůležitější parametr téměř u každé součásti je hmotnost, dále také dostatečná pevnost a houževnatost. Proto se mezi materiály hojně vyskytuje hliníková slitina, která v sobě pojí tyto vlastnosti.

Celková filosofie konstrukce je modulární. Většina součástí je vytvořena tak, aby šla velmi rychle pozměnit jejich poloha v konstrukci, upravit jejich topologie a funkce nebo aby mohlo dojít k jejich úplné výměně. Důvod je ten, že ani při nejoptimističtějších pohledu nedovedu pokládat svoje dílo za konečný produkt, ale spíš jako prototyp, který může položit základní kámen něčemu budoucímu.

Základem konstrukce je rozpěrná tyč s dvěma kladkami, na které je na kluzném vedení umístěna platforma s dalšími dvěma kladkami. Celé vnitřní ústrojí robotu je navrženo tak, aby mělo těžiště co nejniž a chovalo se jako kyvadlo uvnitř hlavního kola. Pogumované kladky se opírají o vnitřní stranu hlavního kola (povrch ráfku), která je v podstatě kolejnicí kruhového profilu, a udávají mu směr a rychlost. Platforma se může celá vůči rozpěrné tyči pohybovat dolů proti pružině a tak ji stlačovat a zároveň měnit polohu těžiště robotu ve svislé rovině. Na platformě jsou umístěny mechanismy pro balancování, skákání a manipulaci. Pod platformou jsou připevněny baterie, kvůli snížení polohy těžiště. V prostoru mezi jednotlivými plechy platformy je prostor pro řídicí elektroniku a pohon opěrného mechanismu.



Obr. 56) Jednokolový robot

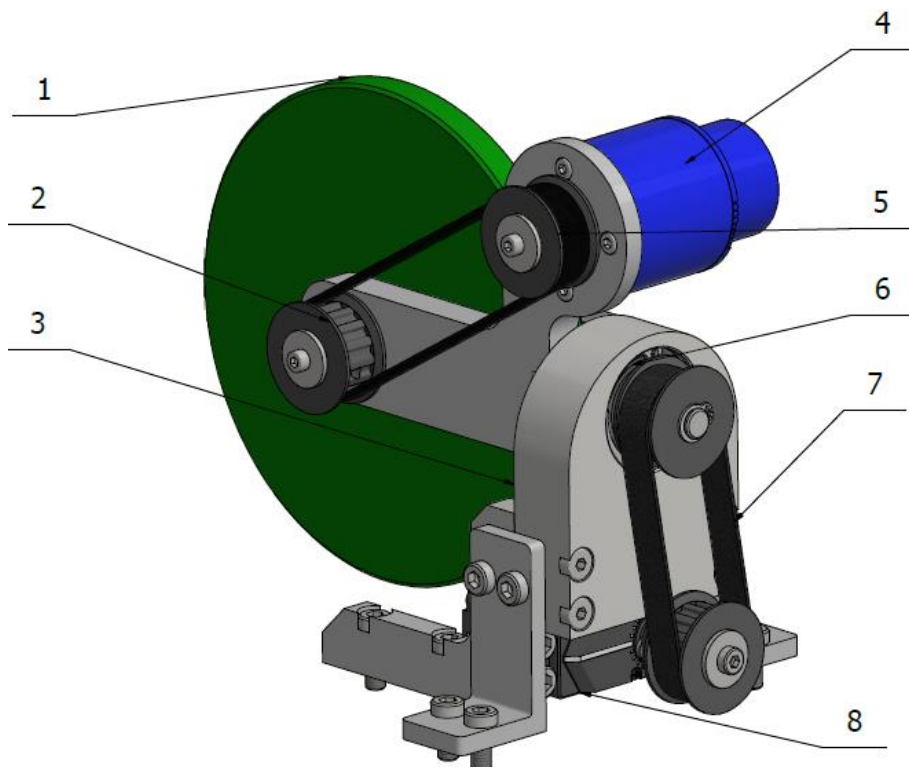


## 10.1 Konstrukce balančního mechanismu

Základním předpokladem pro správnou konstrukci balančního mechanismu byl vhodný výběr pohonů. Pohon setrvačníku obstarává bezkartáčový EC motor od Švýcarské firmy Maxon motors, který je vidět na Obr. 57 (4). Je to 70W motor s jmenovitou rychlostí otáčení  $8230 \text{ ot.min}^{-1}$  a točivým momentem  $0,069 \text{ Nm}$ . Pracuje pod napětím  $18\text{V}$  a jeho maximální proudový odběr je  $3,9 \text{ A}$ . To vše ve velmi kompaktním provedení o hmotnosti  $240 \text{ g}$ . Setrvačník (1) je uložen ve dvou kuličkových ložiscích v naklápěcí konzole (2) a je poháněn přes ozubený řemen (5), což umožňuje optimální umístění pohonu z hlediska vyváženosti systému. Naklápěcí konzola je uložena v dvouřadém kuličkovém ložisku (6) s kosoúhlým stykem v konzole balančního mechanismu (3).

Pro pohon naklápění setrvačníku byl vybrán výkonný modelářský servopohon od Japonské firmy Futaba (8). HPS-CB700 je digitální servo, vybavené bezkartáčovým motorem, o maximálním točivém momentu  $4,8 \text{ Nm}$  a maximální rychlosti  $133 \text{ ot.min}^{-1}$ . Servo dokáže operovat pod napětím  $4,8 - 8,4 \text{ V}$  a váží pouze  $76\text{g}$ . Točivý moment je na naklápěcí konzolu taktéž převezen pomocí převodu ozubeným řemenem (7).

Kompaktní konstrukce obou pohonů dovoluje vytvořit topologii balančního mechanismu tak, aby těžiště zůstalo ve svislé, podélné rovině robotu. Hnací ústrojí provedené prostřednictvím ozubeného řemene je výhodné z hlediska případného odladění prototypu. Takto lze velmi jednoduše změnit převodový poměr pouhou výměnou řemenice, respektive řemenu.



Obr. 57) Balanční mechanismus

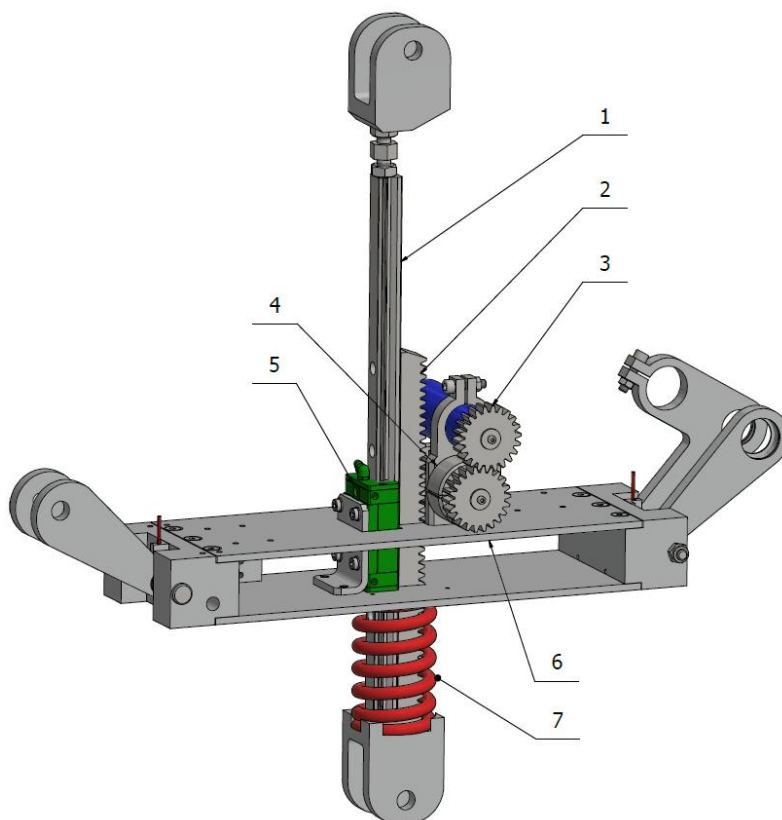
## 10.2 Konstrukce skákacího mechanismu

Na Obr. 58 lze vidět, že skákací mechanismus sestává z pohonného ustrojí (3) s převodem čelními ozubenými koly (toto řešení zajišťuje optimální polohu pohonu v konstrukci, tak aby byly hmotnosti optimálně rozloženy), pevně spojeného s platformou robotu (6), které je zakončené ozubeným kolem, zapadajícím do zubů hřebenu (2), jenž je přišroubovaný na kolejnici lineárního vedení (1), která je uložena ve vozíku (5) pevně připevněného k platformě. Takto může pohon pohybovat s celou platformou dolů proti pružině (7) o tuhosti 100 N/mm, v níž nahromadí se energie se po uvolnění pohonu rázem vypustí a dojde ke skoku.

Výběr vhodného pohonu byl pro konstrukci skákacího mechanismu klíčový. Bylo zapotřebí pohonu, který by vyvinul na ozubené kolo s modulem 2 a průměrem roztečné kružnice 40 mm točivý moment 55 Nm, čímž by posunul celou platformu robotu s veškerým zařízením o 30 mm proti pružině. Tak by došlo k nahromadění energie rovné 45 J, což by teoreticky vystačilo pro skok do výšky 0,3 m.

K vykonání této práce byl vybrán elektromotor s planetovou převodovkou a inkrementálním enkodérem od firmy RobotZone. Pod napětím 12V pracující pohon dokáže vyvinout až 57 Nm při proudovém odběru 20A a hmotnosti 380g. Při maximálním zatížení se otáčí rychlostí 2 ot.min<sup>-1</sup>. Takže zatlačení pružiny bude trvat 4 sekundy.

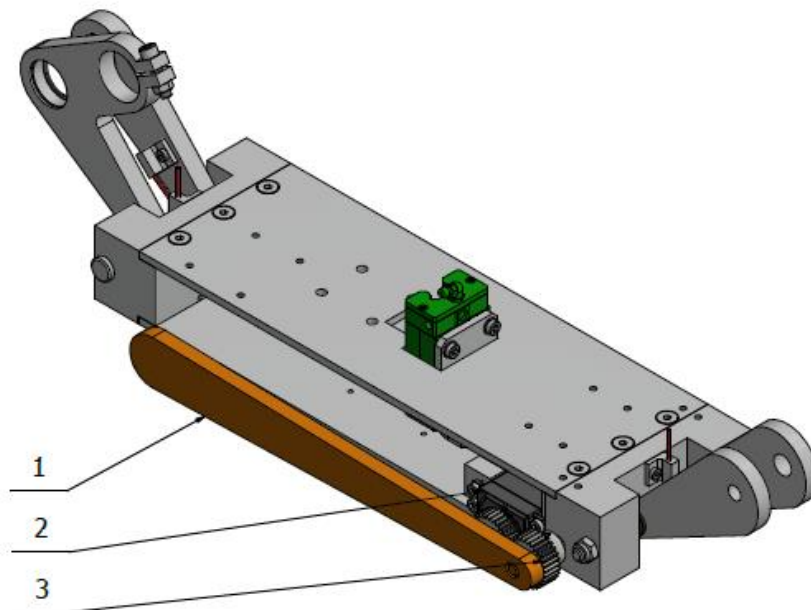
Odpojení pohonu po najetí do požadované polohy je pak provedeno samostředící volnoběžkou (4) UK 17 ZZ od firmy T.E.A. TECHNIK, která dokáže krátkodobě přenést až 61 Nm.



Obr. 58) Skákací mechanismus

### 10.3 Konstrukce opěrného mechanismu

Při konstrukci opěrného mechanismu byl využit servopohon od firmy Futaba, stejný jako pro naklápění setrvačníku. Tento pohon spustí opěrné nohy k zemi, kde vytvoří další dva opěrné body robotu. K tomu může dojít například při sběru vzorků, kdy robot potřebuje celkově zvýšenou stabilitu. Ve výchozí poloze jsou opěrné nohy složeny tak, aby byly rovnoběžné s rovinou platformy. Na Obr. 59 je vidět jedna z noh (1), která je propojena hřídelí, vedoucí uvnitř platformy, s druhou stejnou nohou na opačné straně platformy. Dále je vidět pohon Futaba (2) a převod 1:1 čelním ozubeným kolem (3), přičemž hnané kolo je pevně spojeno s hřídelí a hnací se servem.



Obr. 59) Opěrný mechanismus

### 10.4 Konstrukce rámu a lokomočního ústrojí robotu

Na Obr. 60 lze vidět, že rám robotu se skládá z rozpěrné tyče (9), platformy (5) a hlavního kola (10). Celá tato skupina je navržena tak, aby měla těžiště co nejnižší a chovala se jako kyvadlo uvnitř hlavního kola. Na obou stranách rozpěrné tyče jsou zavěšeny pogumované kladky (1). Rozteč kladek je možno upravit pomocí šroubu M10 (3), který spojuje horní vidlici kladky (2) a kolejnici lineárního vedení (4). Obě vidlice kladek i celá platforma jsou vyrobeny ze slitiny hliníku.

Na osách platformy jsou připevněny páky kladek (11), které jsou pomocí torzních pružin přitlačovány k vnitřnímu povrchu hlavního kola (ráfku). Takto je umožněn přesun celé platformy po svislé ose aniž by došlo ke ztrátě kontaktu mezi kladkami a vedením na vnitřní straně hlavního kola. Při pokusných simulacích v prostředí MSC ADAMS bylo ověřeno, že tato konstrukce se během celého skoku chová relativně stabilně. Platforma je dále tvořena dvěma plošinami mezi nimiž je prostor pro elektroniku a dvěma konzolami, v nichž jsou uloženy osy platformy.

Hlavní kolo sestává z ráfku z hliníkové slitiny, který má takový rozměr, aby na něj šel navléknout konvenční plášť pro 28 palcové kolo. Tímto je zajištěn velký výběr různých komerčně dostupných plášťů pro případný budoucí vývoj. V plášti není vzduch, jak je zvykem,

ale speciální pěnová výplň. To zejména proto, aby nikde v konstrukci nepřekážel ventilek a také, aby byl robot odolný vůči defektu. Vnitřní strana ráfku je v podstatě kolejnice kruhového profilu, po které se mohou pohybovat vodící pogumované kladky.

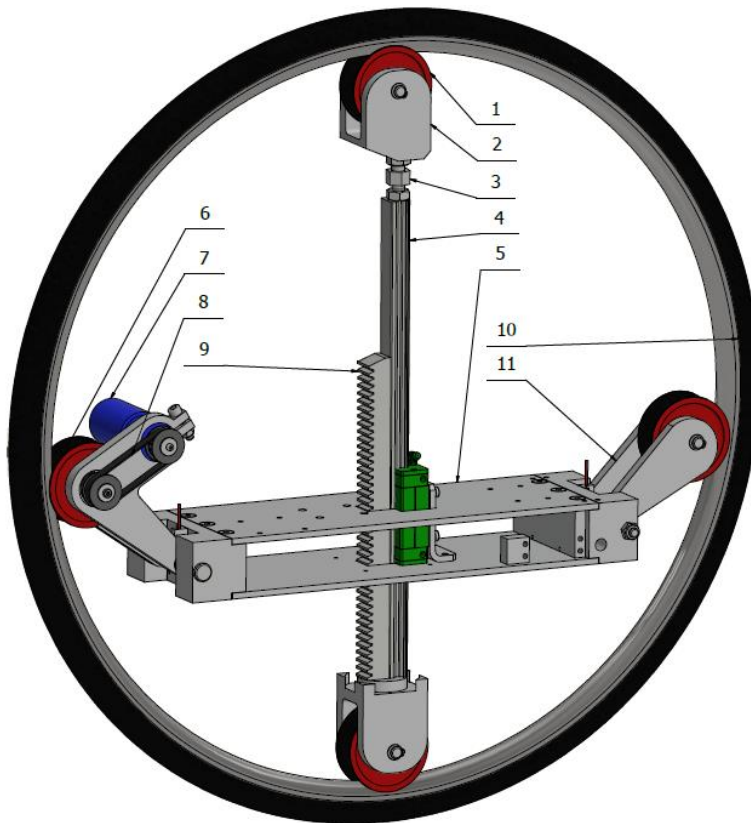
Pro pohon robotu byl vybrán elektromotor s planetovou převodovkou a enkodérem od firmy RobotZone (7). Tento pohon pracující pod napětím 12V má maximální točivý moment 2,2 Nm a rychlost otáčení až 437 ot.min<sup>-1</sup>. Pohon je umístěn přímo na jedné z pák kladek a opět je točivý moment z něj přenášen pomocí převodu 1:1 ozubeným řemenem (8) kvůli optimálnímu rozložení hmotnosti v robotu na pohonnou kladku (6).

Kinematika tohoto typu robotu má však, co se pohonu hlavního kola týče, jistá omezení. Jde zejména o omezené maximální zrychlení a omezené schopnosti jízdy do kopce. Obě tato omezení souvisí s polohou těžiště a lze je částečně eliminovat jeho snížením. Maximální zrychlení robotu je takové, při němž je platforma otočená o 90° a rozpěrná tyč je tedy ve vodorovné poloze. V prostředí MSC ADAMS bylo na základě simulací, kdy byla kinematika robotu uvedena do mezních stavů, experimentálně zjištěno že průměrná maximální hodnota zrychlení robotu by měla být okolo 0,85 m.s<sup>-2</sup>. Tato hodnota počítá i s časem v počátku zrychlování z nulové rychlosti, kdy se vnitřní kyvadlo robotu otáčí a celý robot ještě zůstává na místě. Odpovídající zrychlení na hnacím pohonu je 17,4 rad.s<sup>-2</sup>. Jakékoli vyšší zrychlení na hnacím pohonu je neefektivní, popřípadě může vést k protočení celého vnitřního ústrojí o 360°.

Pro maximální úhel svahu, do něhož je robot schopen vyjet, platí tento vztah:

$$\varphi_s = \sin^{-1} \left( \frac{m_k \cdot R_t}{m_r \cdot R_r} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{13,5 \cdot 70}{15 \cdot 335} \right) = 11^\circ \quad (15)$$

Přičemž  $m_k$  je hmotnost vnitřního kyvadla,  $R_t$  je poloměr vnitřního kyvadla,  $m_r$  je hmotnost celého robotu a  $R_r$  je poloměr celého robotu.



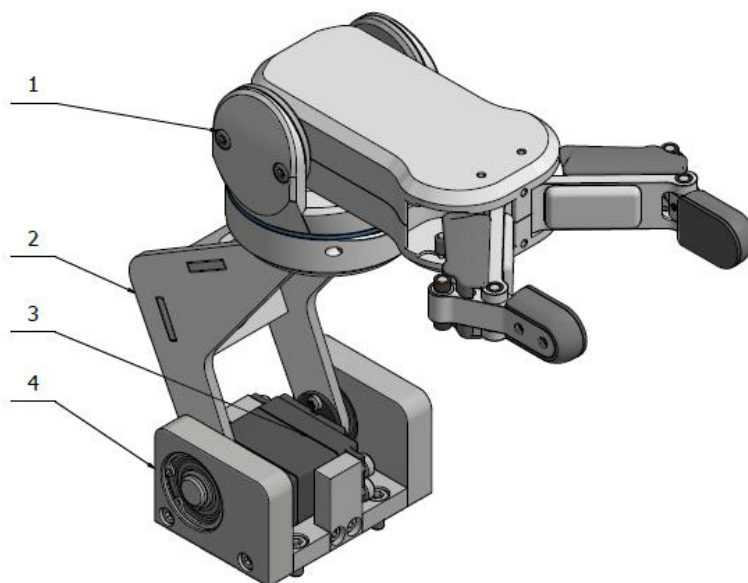
Obr. 60) Lokomoční ústrojí robotu

## 10.5 Konstrukce manipulačního mechanismu

Na Obr. 61 lze vidět, že základem manipulačního mechanismu je uchopovač RG-2 (1) od dánské firmy OnRobot. Tento uchopovač je určen především pro kolaborativní roboty, proto má všechny vlastnosti, které jsou potřeba pro manipulátor jednokolového robotu. Při velmi kompaktních rozměrech a hmotnosti pouhých 0,78 Kg, dokáže unést vzorek o hmotnosti 2 Kg a maximálním rozměru v ose zdvihu prstů 110 mm. Navíc, jeho kinematické uskupení má kromě dvou prstů ještě jeden stupeň volnosti. Uchopovač disponuje jednou rotační osou, na které se může celý otáčet o 180°. Zařízení má být napájeno pod napětím 20 – 25 V a má proudový odběr až 0,6 A. Uchopovač RG2 má vlastní mikrokontrolér, který dokáže automaticky detekovat zdvih, ztrátu přilnavosti a nebo vypočítat užitečné zatížení.

Aby byl ovšem RG-2 plně využitelný v jednokolovém robotu, bylo zapotřebí mu přidat ještě jeden stupeň volnosti prostřednictvím další rotační osy. Pohon této rotační osy byl opět proveden pomocí servopohonu Futaba (3), který již byl využit pro pohon opěrného mechanismu a naklápění gyroskopu. Tato rotační osa je usazena v kuličkových ložiscích ve vyráběném ložiskovém tělese, které je připevněné na povrchu platformy (4). Servo otáčí s ramenem (2), na kterém je přišroubován samotný uchopovač. Takto je možné uchopovač spustit až k zemi, aby mohl sbírat vzorky.

Tento uchopovač je, i za cenu vyšší energetické náročnosti, navrhnut tak, aby vzorek celý zbytek cesty držel. To nese hned dvě výhody. Při vhodném naprogramování by mohl uchopovač držet vzorek tak, aby to pomáhalo v balancování robotu. A v neposlední řadě absence odkládací plochy zmenšuje celkové rozměry a hmotnost robotu.



Obr. 61) Manipulační mechanismus

## 10.6 Elektronika

Akumulátor robotu je složen z 32 Lithium-iontových článků baterie 21700 o napětí 3,6 V, kapacitě 4 Ah a maximálním vybíjecím proudem 35A. Výhoda jednotlivých článků oproti celé nakupované baterii je ve flexibilitě, variabilitě a možnosti zaujmout optimální místo v topologii systému. Také je možné z této skládané baterie vyvézt vodiče o různých napětích a není tedy nutné používat měniče napětí pro jednotlivé pohony. Servopohony Futaba totiž vyžadují napětí maximálně 8V a uchopovač minimálně 20V, ostatní komponenty operují při 12V. Články o celkové hmotnosti 2,4 Kg jsou umístěny zespodu platformy tak, aby bylo těžiště robotu co nejnižší. Teoreticky, při zapojení vždy čtyřech článků do série by vznikl akumulátor o napětí 14,4 V a celkové kapacitě 32 Ah, což by mohlo vystačit asi na 30 minut provozu.

Srdcem elektroniky bude řídicí mikrokontrolér, který bude sbírat data z enkodérů a senzorů a na základě toho posílat data do driverů všech pohonů. Také je nutné aby dokázal komunikovat s uchopovačem a externím řídicím systémem (neboť robot bude ovládaný dálkově). K řízení je zatím uvažováno pouze dvou stupňů volnosti, a to naklopení setrvačnicku (rotace kolem vertikální osy) a zrychlení pohonu hlavního kola (pohyb dopředu a dozadu).

V neposlední řadě bude robot osazen senzory pro orientaci v prostoru jako 3D kamera a sonar. Dále senzory pro polohu robotu – tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr.

## 11 VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Výkresová dokumentace byla zpracována v prostředí Autodesk Inventor. Hlavní sestava jednokolového robota je rozdělena celkem do devíti podsestav.

Tab 13) Číslování výkresů

Název	Číslo výkresu
Kolo	3-01-00-00
Rozpěrná tyč	3-02-00-00
Šasi	2-03-00-00
Balanční mechanismus	2-04-00-00
Manipulační mechanismus	2-05-00-00
Pohon skákacího mechanismu	2-06-00-00
Opěrný mechanismus	3-07-00-00
Pohonný mechanismus	3-08-00-00
Hnaná kladka	3-09-00-00

Hlavní sestava je označena číslem výkresu 2-00-00-00. První číslice odpovídá formátu výkresu. První dvojčíslí je označení sestavy (01 pro Kolo až 09 pro Hnanou kladku). Druhé dvojčíslí je označení podsestavy (pokud existuje v dané sestavě; pokud ne, dvojčíslí zůstává 00) a třetí je pak označení jednotlivého dílu.

Pro tvorbu výkresové dokumentace byla využita odborná literatura Základy konstruování [33] a také Strojnické tabulky [34].





## 12 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola si klade za cíl popsat odhad přibližné sumy za nakupované a vyráběné komponenty a montáž. Vzhledem k tomu, že řešení elektronických komponent není v zadání této práce, jsou z úvahy vynechány. Nutno podotknout, že nebylo autorovým záměrem vytvořit cenově dostupnou nebo naopak extrémně nákladnou konstrukci. Výsledná cena se však bude spíše odvíjet od nakupovaných dílů, především elektroniky.

Tab 14) Seznam obchodního zboží

Obchodní zboží	Počet	Přibližná cena v Kč za všechny kusy
Pohon kola	1	1 500
Pohon skákacího mechanismu	1	1 500
Pohon setrvačníku	1	5 400
Servo Futaba	3	4 700
Baterie	32	6 500
Uchopovač OnRobot	1	75 000
Plášť 28 "	1	500
Výplň pláště 28 "	1	2 500
Pružina	1	1 200
Torsní pružina	2	500
Volnoběžka	1	1 200
Ozubené kolo	3	600
Řemenice	6	1350
Řemen	3	675
Vozík HIWIN	1	800
Lineární vedení HIWIN	1	2 400
Výsledná cena obchodního zboží		106 325

Tab 15) Seznam vyráběných položek

Vyráběné položky	Počet	Přibližná cena v Kč
Ráfek	1	2 000
Rozpěrná tyč	1	10 000
Šasi	1	9 000
Setrvačník	1	1 000
Naklápěcí konzola setrvačníku	1	2 000
Konzola balančního mechanismu	1	2 000
Opěrné nohy	1	2 000

Konzola manipulačního mechanismu	1	2 000
Rameno manipulačního mechanismu	1	1 000
Konzoly pohonu skákacího mechanismu	1	2 000
Hřídele pohonu skákacího mechanismu	1	1 000
Montáž		6 000
Výsledná cena vyráběných položek		40 000

Celková cena robotu bude tedy cca 146 325 Kč bez řídicí elektroniky a softwaru.

## 13 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Diplomová práce řeší několik problémů týkajících se balancování jednokolového robota, skákání robotů a uchopování vzorků.

### 13.1 Možné pokračování

Diplomová práce řeší pouze mechanickou část robota a částečně elektronickou. Chybí konkrétní vyřešení celé elektronické soustavy včetně všech snímačů, měničů napětí a řídicí jednotky. A především je pro fungování robota potřeba vyřešit software.

Je důvodné předpokládat, že pro komplexní vyřešení všech soustav robota bude nutné některé části mechanické soustavy ještě pozměnit. Zejména testy reálného prototypu by mohly ukázat spoustu dalších úskalí, se kterými bude nutné se vypořádat. Proto nepovažuji ani vývoj mechanické soustavy za zcela ukončený.

Dále bych ještě zmínil myšlenky, nad kterými by stálo za to uvažovat, kdyby došlo na realizaci podobného projektu. Tou první je náhrada volnoběžky za elektromagnetickou spojku. Ta by zaručila trvalé snížení platformy (těžiště), což by poskytlo robotu lepší manévrovatelnost s manipulátorem, větší úhel svahu, který by byl schopen vyjet a v neposlední řadě vyšší hodnotu maximálního zrychlení. To vše za cenu vyšší hmotnosti a proudového odběru.

Dále bych prozkoumal možnosti řízení robota prostřednictvím manipulátoru. Jeho pohybováním v příčné ose dochází ke změnám polohy těžiště, což by mohlo vést k částečné nebo plné náhradě gyroskopu. Bylo by ovšem výpočetně složité robot řídit manipulátorem, který by měl proměnlivou hmotnost v závislosti na hmotnosti aktuálně neseného vzorku.

Jinou dosud neprozkoumanou oblastí je další stupeň volnosti řízení robota a to řízení rychlosti otáčení setrvačníku. Kombinací BLDC motorů a ECS regulátorů by toho mohlo být dosaženo. Přínosem by byl proměnlivý gyroskopický moment, což by bylo výhodné zejména pro spolehlivé řízení robota v nízkých i vysokých rychlostech.

### 13.2 Využití v praxi

Jednokolový robot, navrhnutý v této práci, lze využít v praxi zejména k průzkumným účelům. Je navržen pro pohyb v náročném terénu a má schopnost sběru vzorků. Jeho dynamická stabilita podtržená schopností skákání jej determinuje pro pohyb v silně nepřístupném terénu. Bylo by možné jej využít například pro odminování nebo jako planetární kosmickou sondu pro sběr vzorků mimo planetu Zemi.



## 14 ZÁVĚR

Výsledkem této diplomové práce je konstrukční návrh jednokolového robotu se schopností skákání a sběru vzorků. V rešeršní části práce byl vpracován přehled současného stavu poznání balančních mechanismů a dále byla stručně popsána teorie jízdy na jednom kole a možné způsoby řešení skákacího mechanismu.

Kapitola Systémový rozbor se zabývá zadáním práce. Byla zde vyřešena komplexní metodika postupu práce pro dosažení optimálního řešení. Bylo zde také navrženo systémové řešení průniku několika souborů parametrů patřící ke třem hlavním funkcím robotu: balancování, skákání, manipulace se vzorky.

Na dalších stranách byly popsány návrhové varianty, které zohledňují funkci robotou. Načež byla vypracována multikriteriální analýza, která ukázala optimální řešení.

V deváté kapitole je popsán postup při dynamických výpočtech a simulacích v prostředí MSC ADAMS. Na základě toho byly vybrány pohony a uchopovač a mohlo dojít k realizaci samotné konstrukce robotu.

V závěrečných kapitolách byl sestaven systém značení výkresů, byla vypracována analýza nákladů a v neposlední řadě bylo pojednáno o smyslu práce a jejím možném pokračování.

Cíle této diplomové práce byly splněny. Součástí výstupu je i kompletní výkresová dokumentace robotu.

Existuje mnoho správných způsobů, jak se přiblížit ideálu. Práce konstruktéra mnohdy spočívá v intuitivním nalézání nejméně špatného kompromisu mezi mnoha. Zdali je možné považovat v této práci navrhnutou cestu k řešení problému jednokolového robotu se schopností skákání a sběru vzorků za optimální, ukáže čas. Opravdovým smyslem této práce bylo ukázat, že řešení tohoto problému existuje, a zároveň pootevřít dveře k možnému stažení této myšlenky z teoretických úvah k realizaci.



## 15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BROWN, H.b. a Yangsheng XU. A single wheel, gyroscopically stabilized robot. *IEEE Robotics & Automation Magazine* [online]. IEEE, 1997, 4(3), 39-44 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1109/100.618022. ISSN 1070-9932.
- [2] Hemmings Unicycle 1869. In: *Amazon* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Hemmings-Unicycle-Invention-Velocipede-Engraving/dp/B07C4XWN94>
- [3] Monowheels: Page 3: An idea not quite ready for business funding. In: *Douglas self* [online]. 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/TRANSPORT/motorwhl/motorwhl3.htm>
- [4] KNOFLÍČEK, Radek. *Mobilní roboty pro průmyslové využití - VUTBOT 2*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2005, 98 s. : il. (převážně barev.) ; 25 cm. ISBN 80-7204-387-0.
- [5] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [6] *Boston dynamics* [online]. In: . [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.bostondynamics.com/>
- [7] JUNG, Seul. Experimental studies of balancing and driving control of a single wheeled mobile robot: GYROBO II. In: *2011 8th Asian Control Conference (ASCC)* [online]. IEEE, 2011, s. 96-100 [cit. 2019-03-03]. ISBN 9781612844879.
- [8] SHENG, Z a K YAMAFUJI. Postural stability of a human riding a unicycle and its emulation by a robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 1997, 13(5), 709-720 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1109/70.631232. ISSN 1042-296X.
- [9] HA, M. a S JUNG. Angle compensation by fuzzy logic for balancing a single-wheel mobile robot. In: *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)* [online]. IEEE, 2015, s. 1-4 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1109/ASCC.2015.7244524.
- [10] LEE, S. a S JUNG. Vibration reduction filter design for balancing control of GYROBO using an AHRS. In: *2015 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)* [online]. IEEE, 2015, 2015-, s. 122-126 [cit. 2020-05-11]. DOI: 10.1109/MFI.2015.7295796.
- [11] JIN, Hongzhe, Jie ZHAO, Jizhuang FAN a Jangmyung LEE. Gain-scheduling control of a 6-DOF single-wheeled pendulum robot based on DIT parameterization. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 2011, s. 3511-3516 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980487. ISBN 9781612843865.
- [12] NAKAJIMA, R, T TSUBOUCHI, S YUTA a E KOYANAGI. A development of a new mechanism of an autonomous unicycle. In: *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative*

*Robotics for Real-World Applications. IROS '97* [online]. IEEE, 1997, **2**, 906-912 vol.2 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/IROS.1997.655117. ISBN 0780341198.

- [13] Projects: A Single-Wheel, Gyroscopically Stabilized Robot. In: *Carnegie Mellon University: School of computer science* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.cs.cmu.edu/~cyberscout/projects.html>
- [14] FERREIRA, Enrique, Shu-jen TSAI, Christiaan PAREDIS a H. BROWN. Control of the Gyrover: a single-wheel gyroscopically stabilized robot. *Advanced Robotics* [online]. Taylor & Francis Group, 2000, **14**(6), 459-475 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1163/156855300741951. ISSN 0169-1864.
- [15] CIESLAK, Patryk, Tomasz BURATOWSKI, Tadeusz UHL a Mariusz GIERGIEL. The mono-wheel robot with dynamic stabilisation. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. Elsevier B.V, 2011, **59**(9), 611-619 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1016/j.robot.2011.05.002. ISSN 0921-8890.
- [16] FUJIMOTO, Y a S UCHIDA. Three Dimensional Posture Control of Mono-wheel Robot with Roll Rotatable Torso. In: *2007 IEEE International Conference on Mechatronics* [online]. IEEE, 2007, s. 1-5 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/ICMECH.2007.4280051. ISBN 1424411831.
- [17] HU, Zeyan, Lei GUO, Shimin WEI a Qizheng LIAO. Design of LQR and PID controllers for the self balancing unicycle robot. In: *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)* [online]. IEEE, 2014, s. 972-977 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/ICInfA.2014.6932792.
- [18] JUNG, Seul. Novel air blowing control for balancing a unicycle robot. In: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2010, s. 2529-2530 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1109/IROS.2010.5649120. ISBN 9781424466740.
- [19] PARK, J.H a S JUNG. Development and control of a single-wheel robot: Practical Mechatronics approach. *Mechatronics* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **23**(6), 594-606 [cit. 2020-04-04]. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.05.010. ISSN 0957-4158.
- [20] JUNG, Seul. Experimental studies of balancing control for a disc-typed mobile robot using a neural controller: GYROBO. In: *2010 IEEE International Symposium on Intelligent Control* [online]. IEEE, 2010, s. 1499-1503 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1109/ISIC.2010.5612929. ISBN 9781424453603.
- [21] CHANTARACHIT, Surachat a Manukid PARNICHKUN. Development and control of a unicycle robot with double flywheels. *Mechatronics* [online]. Elsevier Ltd, 2016, **40**, 28-40 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2016.10.011. ISSN 0957-4158.
- [22] JIN, Hongzhe, Tianlu WANG, Fachuan YU, Yanhe ZHU, Jie ZHAO a Jangmyung LEE. Unicycle Robot Stabilized by the Effect of Gyroscopic Precession and Its Control Realization Based on Centrifugal Force Compensation. *IEEE/ASME*



- Transactions on Mechatronics* [online]. IEEE, 2016, **21**(6), 2737-2745 [cit. 2020-05-11]. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2590020. ISSN 1083-4435.
- [23] JIN, Hongzhe, Yang ZHANG, Hui ZHANG, Zhangxing LIU, Yubin LIU, Yanhe ZHU a Jie ZHAO. Steering Control Method for an Underactuated Unicycle Robot Based on Dynamic Model. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. Hindawi, 2018, **2018** [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1155/2018/5240594. ISSN 1024-123X.
- [24] U3-X PERSONAL MOBILITY. *ASIMO* [online]. 2019 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://asimo.honda.com/innovations/u3-x-personal-mobility/>
- [25] Honda 技术: U3-X. In: *Honda* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.honda.com.cn/sp/technology/futuretech/u3x.php>
- [26] RUAN, Xiaogang, Xiaoqing ZHU, Yalei LI a Ruoyan WEI. Lateral stabilization of a single wheel robot applying electromagnetic force. In: *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation* [online]. IEEE, 2012, s. 3675-3680 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/WCICA.2012.6359085. ISBN 9781467313971.
- [27] ZHU, Xq, Xg RUAN, Zg CHEN, Ry WEI a Y XIAO. Electromagnetic Force Balanced Single-Wheel Robot. *Chinese Journal Of Electronics* [online]. TECHNOLOGY EXCHANGE LIMITED HONG KONG, 2016, **25**(3), 441-447 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1049/cje.2016.05.008. ISSN 1022-4653.
- [28] NOVÁK, Ivo. Elektrický proud v magnetickém poli. In: *ICT v učivu elektromotorů na SŠ* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.emotor.cz/elektricky-proud-v-magnetickem-poli.htm>
- [29] KAPPELER, Fabian. *Unicycle robot*. Lausanne, 2007. Semestrální. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [30] HALDANE, Duncan W., M. M. PLECNÍK, J. K. YIM a R. S. FEARING. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation. *SCIENCE ROBOTICS*. 2016, (1). ISSN 2470-9476.
- [31] ZHANG, Jun, Yunshuai ZHU, Hui WANG a Jimei ZHANG. Design of a bio-inspired jumping robot for rough terrain. In: *2010 The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology* [online]. Nanjing, China: IEEE, 2010, **2**, s. 40-43 [cit. 2020-01-19]. DOI: 10.1109/ESIAT.2010.5567269. ISBN 9781424473878.
- [32] AHN, Jeongdo, Jongwon PARK, Kyung-soo KIM a Soohyun KIM. Frog-inspired jumping robot for overcoming high obstacles. In: *IEEE ISR 2013* [online]. Daejeon, Korea: IEEE, 2013, s. 1-4 [cit. 2020-01-19]. DOI: 10.1109/ISR.2013.6695739.
- [33] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Robert KOVÁŘÍK. *Základy konstruování*. 2. vyd. Brno: PC DIR, 1997, 186 s. ISBN 80-214-0940-1.

- [34] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999, 985 s. : il. ISBN 80-7183-164-6.

# 16 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 16.1 Seznam zkratk a symbolů

ZKRATKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
BA1	Body parametru 1 varianty B1	[-]
BA2	Body parametru 2 varianty B1	[-]
BA3	Body parametru 3 varianty B1	[-]
BA4	Body parametru 4 varianty B1	[-]
BA5	Body parametru 5 varianty B1	[-]
BA6	Body parametru 6 varianty B1	[-]
BA7	Body parametru 7 varianty B1	[-]
BA8	Body parametru 8 varianty B1	[-]
BA9	Body parametru 9 varianty B1	[-]
BA10	Body parametru 10 varianty B1	[-]
BA11	Body parametru 11 varianty B1	[-]
BA12	Body parametru 12 varianty B1	[-]
BA13	Body parametru 13 varianty B1	[-]
BB1	Body parametru 1 varianty B2	[-]
BB2	Body parametru 2 varianty B2	[-]
BB3	Body parametru 3 varianty B2	[-]
BB4	Body parametru 4 varianty B2	[-]
BB5	Body parametru 5 varianty B2	[-]
BB6	Body parametru 6 varianty B2	[-]
BB7	Body parametru 7 varianty B2	[-]
BB8	Body parametru 8 varianty B2	[-]
BB9	Body parametru 9 varianty B2	[-]
BB10	Body parametru 10 varianty B2	[-]
BB11	Body parametru 11 varianty B2	[-]
BB12	Body parametru 12 varianty B2	[-]
BB13	Body parametru 13 varianty B2	[-]
BLDC	Brushless direct current (z angličtiny: bezkartáčový stejnosměrný)	[-]
DC	Direct current (z angličtiny: stejnosměrný proud)	[-]
EC	Elektronicky komutovaný	[-]
ECS	Electronic speed contoler (z angličtiny: elektronické řízení rychlosti)	[-]

$F_{gk}$	Tíhová síla vnitřního kyvadla robotu	N
$F_k$	Síla působící od pohonu robotu v místě dotyku kladky a ráfku při optimálním zrychlení	N
$F_p$	Síla od točivého momentu pohonu skákacího mechanismu v místě styku roztečné kružnice pastorku a hřebenu	N
$f_s$	Frekvence otáčení setrvačníku	Hz
$g$	Gravitační zrychlení planety země	m.s-1
$J_s$	Moment setrvačnosti setrvačníku	Kg.m <sup>2</sup>
$M_g$	Gyroskopický moment gyroskopu	Nm
$M_{gk}$	Točivý moment vyvíjený tíhovou silou vnitřního kyvadla robotu	Nm
$M_k$	Točivý moment pohonu hnací kladky	Nm
$mk$	Hmotnost vnitřního kyvadla robotu	Kg
$M_n$	Točivý moment pohonu naklápění setrvačníku	Nm
$M_p$	Točivý moment pohonu skákacího mechanismu	Nm
$mr$	Hmotnost robotu	Kg
$M_s$	Točivý moment pohonu setrvačníku	Nm
$m_s$	Hmotnost setrvačníku	Kg
Obr.	Obrázek	[-]
$R_d$	Vzdálenost osy Z robotu od bodu dotyku mezi kladkou a ráfkem	m
$R_k$	Poloměr hnací kladky	m
$r_s$	Poloměr setrvačníku	m
$R_p$	Poloměr roztečné kružnice pastorku pohonu skákacího mechanismu	m
$R_r$	Poloměr kola robotu	m
$R_t$	Vzdálenost osy Z robotu od těžiště robotu	m
Tab.	Tabulka	[-]
$ts$	Doba rozběhu setrvačníku	s
SA1	Body parametru 1 varianty S1	[-]
SA2	Body parametru 2 varianty S1	[-]
SA3	Body parametru 3 varianty S1	[-]
SA4	Body parametru 4 varianty S1	[-]
SA5	Body parametru 5 varianty S1	[-]
SA6	Body parametru 6 varianty S1	[-]
SA7	Body parametru 7 varianty S1	[-]
SA8	Body parametru 8 varianty S1	[-]

SA9	Body parametru 9 varianty S1	[-]
SA10	Body parametru 10 varianty S1	[-]
SA11	Body parametru 11 varianty S1	[-]
SA12	Body parametru 12 varianty S1	[-]
SA13	Body parametru 13 varianty S1	[-]
SB1	Body parametru 1 varianty S2	[-]
SB2	Body parametru 2 varianty S2	[-]
SB3	Body parametru 3 varianty S2	[-]
SB4	Body parametru 4 varianty S2	[-]
SB5	Body parametru 5 varianty S2	[-]
SB6	Body parametru 6 varianty S2	[-]
SB7	Body parametru 7 varianty S2	[-]
SB8	Body parametru 8 varianty S2	[-]
SB9	Body parametru 9 varianty S2	[-]
SB10	Body parametru 10 varianty S2	[-]
SB11	Body parametru 11 varianty S2	[-]
SB12	Body parametru 12 varianty S2	[-]
SB13	Body parametru 13 varianty S2	[-]
SC1	Body parametru 1 varianty S3	[-]
SC2	Body parametru 2 varianty S3	[-]
SC3	Body parametru 3 varianty S3	[-]
SC4	Body parametru 4 varianty S3	[-]
SC5	Body parametru 5 varianty S3	[-]
SC6	Body parametru 6 varianty S3	[-]
SC7	Body parametru 7 varianty S3	[-]
SC8	Body parametru 8 varianty S3	[-]
SC9	Body parametru 9 varianty S3	[-]
SC10	Body parametru 10 varianty S3	[-]
SC11	Body parametru 11 varianty S3	[-]
SC12	Body parametru 12 varianty S3	[-]
SC13	Body parametru 13 varianty S3	[-]
V1	Váha parametru 1	[-]
V2	Váha parametru 2	[-]
V3	Váha parametru 3	[-]
V4	Váha parametru 4	[-]
V5	Váha parametru 5	[-]
V6	Váha parametru 6	[-]
V7	Váha parametru 7	[-]
V8	Váha parametru 8	[-]

V9	Váha parametru 9	[-]
V10	Váha parametru 10	[-]
V11	Váha parametru 11	[-]
V12	Váha parametru 12	[-]
V13	Váha parametru 13	[-]
$\varepsilon_{B1}$	Hodnocení varianty B1	[-]
$\varepsilon_{B2}$	Hodnocení varianty B2	[-]
$\varepsilon_{S1}$	Hodnocení varianty S1	[-]
$\varepsilon_{S2}$	Hodnocení varianty S2	[-]
$\varepsilon_{S3}$	Hodnocení varianty S3	[-]
$\varphi_s$	Maximální úhel svahu, do něhož je robot schopen vyjet	°
$\omega_s$	Úhlová rychlost setrvačníku	rad.s-1
$\omega_n$	Úhlová rychlost otáčení pohonu naklápění setrvačníku	rad.s-1

## 16.2 Seznam tabulek

Tab 1) Rozdělení jednokolových robotů .....	37
Tab 2) Systém podstatných veličin.....	41
Tab 3) Základní části robotu.....	42
Tab 4) Váha reprezentativních parametrů .....	51
Tab 5) Varinta B1 .....	53
Tab 6) Varianta B2 .....	54
Tab 7) Varianta S1 .....	55
Tab 8) Varianta S2 .....	56
Tab 9) Varianta S3 .....	57
Tab 10) Výsledky multikriteriální analýzy .....	57
Tab 11) Seznam vstupních parametrů .....	60
Tab 12) Výstupní hodnoty ze simulace .....	71
Tab 13) Číslování výkresů .....	79
Tab 14) Seznam obchodního zboží .....	81
Tab 15) Seznam vyráběných položek .....	81

## 16.3 Seznam obrázků

Obr. 1) Velosipede [2] .....	16
Obr. 2) DYNO-WHEEL [3] .....	17
Obr. 3) Mobilní roboty od firmy Boston Dynamics [6] .....	18
Obr. 4) Jednokolový robot s horizontálním diskem [8].....	19

Obr. 5) a) GYROBO II, b) Popis funkce gyroskopu v robotu GYROBO [10] .....	20
Obr. 6) Jednokolový robot dle Shnega a Yamafuji [8] .....	21
Obr. 7) Jednokolový robot s horizontálním a vertikálním diskem [11] .....	22
Obr. 8) Jednokolový robot s kolem ve tvaru rugby balonu [12] .....	22
Obr. 9) GYROVER [13] .....	23
Obr. 10) Funkční schéma Gyroveru [1] .....	24
Obr. 11) Vnitřní části Gyroveru [14] .....	24
Obr. 12) Kinematika zatažení Gyroveru [1] .....	25
Obr. 13) Jednokolový robot stabilizovaný pákou uvnitř kola [15] .....	26
Obr. 14) Jednokolový robot stabilizovaný pákou vně kola [16] .....	26
Obr. 15) Jednokolový robot stabilizovaný posuvnou tyčí [17] .....	27
Obr. 16) Jednokolový robot stabilizovaný dmychadly [18] .....	27
Obr. 17) Kinematika zatažení pomocí gyroskopu [19] .....	28
Obr. 18) GYROBO I [20] .....	28
Obr. 19) Jednokolový robot se dvěma horizontálními gyroskopy [21] .....	29
Obr. 20) Schéma jednokolového robotu stabilizovaného dvěma vertikálními gyroskopy [22] .....	30
Obr. 21) Jednokolový robot stabilizovaný dvěma vertikálními gyroskopy [23] .....	30
Obr. 22) Honda U3-X [25] .....	31
Obr. 23) Jednokolový robot stabilizovaný Lorentzovou silou [26] .....	31
Obr. 24) a) Lorentzova síla [28] .....	32
Obr. 25) Vybočení, klonění, klopení (anglicky: Yaw, Pitch, Roll) [29] .....	33
Obr. 26) Kinematika člověka na jednokolce [8] .....	34
Obr. 27) Graf schopnosti skoku jednotlivých mobilních robotů a zvířat [30] .....	35
Obr. 28) Skákací mechanismus inspirovaný kobylkou [31] .....	36
Obr. 29) Skákací mechanismus inspirovaný žábou [32] .....	36
Obr. 30) Diagram postupu práce .....	40
Obr. 31) Diagram reprezentativních parametrů .....	41
Obr. 32) Varianta B1 a) pohon b) balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) prostor pro skákací mechanismus .....	45
Obr. 33) Varianta B2 a) pohon b) balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) prostor pro skákací mechanismus .....	46
Obr. 34) Varianta S1 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) skákací mechanismus .....	47
Obr. 35) Varianta S2 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) odpružení (skákací mechanismus) .....	48
Obr. 36) Varianta S3 a) pohon b) prostor pro balanční mechanismus c) kolo d) manipulátor e) baterie f) skákací mechanismus .....	49
Obr. 37) Graf váhy reprezentativních parametrů .....	52
Obr. 38) Deklarace os robotu .....	59
Obr. 39) Model robotu v prostředí MSC Adams .....	62
Obr. 40) Model robotu v MSC Adams zrychluje a natačí setrvačnick .....	62
Obr. 41) Graf závislosti naklopení setrvačnicku na naklopení robotu .....	63
Obr. 42) Graf závislosti naklopení robotu a natočení kolem osy Y .....	63
Obr. 43) Robot při maximálním zrychlení v prostředí MSC Adams .....	63
Obr. 44) Graf závislosti rychlosti robotu na naklopení rozpěrné tyče .....	64
Obr. 45) a) Robot před skokem .....	64

Obr. 46) Graf závislosti stlačení pružiny na výšce skoku .....	64
Obr. 47) Graf závislosti rychlosti otáčení setrvačníku na čase (medián červeně).....	65
Obr. 48) Graf závislosti točivého momentu pohonu setrvačníku na čase (medián červeně) ...	65
Obr. 49) Graf závislosti naklopení setrvačníku na čase .....	66
Obr. 50) Graf závislosti točivého momentu pohonu naklopení setrvačníku na čase (medián červeně) .....	67
Obr. 51) Graf závislosti rychlosti robotu na čase .....	68
Obr. 52) Graf závislosti rychlosti otáčení pohonné kladky na čase .....	68
Obr. 53) Graf závislosti točivého momentu pohonu kladky na čase (medián červeně) .....	68
Obr. 54) Graf závislosti síly vyvíjené na pružinu na čase .....	70
Obr. 55) Graf závislosti stlačení pružiny na čase .....	70
Obr. 56) Jednokolový robot.....	72
Obr. 57) Balanční mechanismus.....	73
Obr. 58) Skákací mechanismus .....	74
Obr. 59) Opěrný mechanismus.....	75
Obr. 60) Lokomoční ústrojí robotu.....	76
Obr. 61) Manipulační mechanismus.....	77



## 17 SEZNAM PŘÍLOH

Přílohou této práce kompletní výkresová dokumentace, což jsou následující výkresy:

ČÍSLO VÝKRESU	NÁZEV
2-00-00-00	JEDNOKOLOVÝ ROBOT
3-01-00-00	KOLO
3-01-00-01	RÁFEK
3-02-00-00	ROZPĚRNÁ TYČ
3-02-00-01	VIDLICE SPODNÍ
4-02-00-02	VIDLICE HORNÍ
4-02-00-03	ŠROUB
4-02-00-04	OZUBENÝ HŘEBEN L=265
4-02-00-05	LINEÁRNÍ VEDENÍ L=393
2-03-00-00	ŠASI
3-03-01-00	DESKA RÁMU HORNÍ SVAREK
2-03-01-01	DESKA RÁMU HORNÍ
2-03-01-02	PLECH
3-03-00-02	DESKA RÁMU SPODNÍ
4-03-00-03	PÁKA KLADKY PROV. I+II
4-03-00-04	PÁKA HNACÍ KLADKY
3-03-00-05	PÁKOVÁ KONZOLA POHONU
3-03-00-06	KONZOLA RÁMU I
3-03-00-07	KONZOLA RÁMU II
4-03-00-08	OSA
4-03-00-09	KONZOLA TORSNÍ PRUŽINY
4-03-00-10	KONZOLA SERVA
3-04-00-00	BALANČNÍ MECHANISMUS
3-04-00-02	RAMENO KONZOLY SETRVAČNÍKU
3-04-00-03	HŘÍDEL KONZOLY SETRVAČNÍKU
3-04-00-04	PŘÍRUBA SERVA
4-04-00-05	PODLOŽKA
3-04-01-00	OTOČNÁ KONZOLA SETRVAČNÍKU
3-04-01-01	PLECH 1
4-04-01-02	PLECH 2
3-04-02-00	KONZOLA BALNČNÍHO MECHANISMU
3-04-02-01	KONZOLA LOŽISKA
4-04-02-02	PLECH

4-04-02-03	VINKL
3-04-03-00	SETRVAČNÍK
3-04-03-01	TĚLESO SETRVAČNÍKU
4-04-03-02	HŘÍDEL SETRVAČNÍKU
2-05-00-00	MANIPULAČNÍ MECHANISMUS
3-05-01-00	RAMENO UCHOPOVAČE
4-05-01-01	PLECH 1
3-05-01-02	PLECH 2
3-05-01-03	PLECH 3
4-05-01-04	ČEP
3-05-02-00	KONZOLA UCHOPOVAČE
3-05-02-01	PLECH 1 (PROV. P+L)
3-05-02-02	PLECH 2
3-05-02-03	PLECH 3 (PROV. P+L)
2-06-00-00	POHON SKÁKACÍHO MECHANISMU
3-06-00-01	KONZOLA LOŽISKA ZDVIHU
3-06-00-02	KONZOLA POHONU ZDVIHU
3-06-00-03	HŘÍDEL
4-06-00-04	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO Z=20
4-06-00-05	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO Z=22
3-06-01-00	HŘÍDEL VOLNOBĚŽKY
4-06-01-01	NÁBOJ
4-06-01-02	HŘÍDEL
4-06-01-03	PERO
3-07-00-00	OPĚRNÝ MECHANISMUS
3-07-01-00	NOHA SVAREK
4-07-01-01	HŘÍDEL OPĚRNÉHO MECHANISMU
4-07-01-02	NOHA VÝPALEK PRO SVAREK
4-07-00-01	NOHA VÝPALEK
4-07-00-02	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO
4-07-00-03	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO S NÁBOJEM
4-08-00-00	POHONNÝ MECHANISMUS
3-08-01-00	KLADKA HNACÍ SESTAVA
3-08-01-01	HNACÍ KLADKA
3-09-00-00	HNANÁ KLADKA SESTAVA
3-09-00-01	HNANÁ KLADKA
3-09-00-02	OSA